

Isaddora Baratto Fontenelle

**AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES IRREGULARES  
PARAMETRIZADAS, VISANDO APLICAÇÃO NO PROJETO  
PARA MANUFATURA ADITIVA**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique  
Ahrens

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Regiane  
Trevisan Pupo

Florianópolis  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fontenelle, Isadora

Avaliação das estruturas celulares irregulares parametrizadas, visando aplicação no projeto para manufatura aditiva / Isadora Fontenelle ; orientador, Carlos Henrique Ahrens ; coorientadora, Regiane Trevisan Pupo. - Florianópolis, SC, 2016.

95 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Parametrização. 3. Estruturas celulares. 4. Diagrama de Voronoi. 5. Manufatura Aditiva. I. Ahrens, Carlos Henrique. II. Trevisan Pupo, Regiane . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Isaddora Baratto Fontenelle

**AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS CELULARES IRREGULARES  
PARAMETRIZADAS, VISANDO APLICAÇÃO NO PROJETO  
PARA MANUFATURA ADITIVA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 17 de Junho de 2016.

---

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.  
Orientador

---

Prof.<sup>a</sup> Regiane Pupo Trevisan, Dr.<sup>a</sup>  
Coorientadora

---

Prof. Armando Albertazzi Jr, Dr.  
Coordenador do POSMEC

**Banca Examinadora**

---

Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

---

Prof. Guilherme Maris de Oliveira Barra, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.<sup>a</sup> Ana Verônica Pazmino Dr.<sup>a</sup>  
Universidade Federal de Santa Catarina



Ao meu pai, que mais uma vez deixou  
um pouco de si para que eu pudesse  
melhorar um pouco de mim.



## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é fruto de esforço pessoal, entretanto diversas pessoas, colegas e amigos, possibilitaram ao seu modo a realização deste. Portanto gostaria de agradecer:

À Universidade Federal de Santa Catarina;

Ao laboratório Nimma, pelo suporte oferecido;

Ao professor Carlos Henrique Ahrens, orientador, pela confiança e oportunidade;

À professora Regiane Trevisan Pupo, coorientadora, pela confiança e oportunidade;

A todos os colegas de laboratório que proporcionaram momentos de descontração além de suporte ao desenvolvimento das atividades, em especial ao Marco Aurélio Bittencourt, estagiário, pelo carinho e parceria.

Ao Jorge Vicente Lopes, do CTI Renato Archer em Campinas, pela fabricação dos corpos de prova.

Ao professor Marcio Celso Fredel, do núcleo de pesquisas em materiais cerâmicos e compósitos - CERMAT da UFSC, pelo ensaio de impacto Charpy.

Ao professor Carlos Rodrigo Roesler, do laboratório de engenharia biomecânica - LeBM da UFSC, pelo ensaio de flexão três pontos.

Ao professor Helton José Alvez, do laboratório de desenvolvimento e otimização de processos bioquímicos - PROBIO da UFPR, pela microscopia eletrônica de varredura.

Aos professores do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da UFSC pelo conhecimento transmitido.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.





“Em algum lugar algo incrível está esperando para ser descoberto.”

(Carl Sagan)



## RESUMO

No projeto para manufatura aditiva tem crescido o interesse em utilizar geometrias conhecidas por estruturas celulares. Esta alternativa de projeto tem como princípio projetar peças cuja fabricação por manufatura aditiva resulte na deposição de material, camada por camada, apenas onde for necessário, com o objetivo de fabricar peças leves, sem comprometer sua estrutura mecânica. Ao se utilizar neste processo de projeto, conceitos de parametrização, empregando-se, por exemplo, diagrama de Voronoi, pode-se projetar peças geometricamente complexas, com possibilidade de controlar a variação composicional de sua estrutura celular irregular. Apesar dessas vantagens há pouca informação em relação aos efeitos causados nas propriedades mecânicas de peças fabricadas por manufatura aditiva pela inclusão de estruturas celulares. Neste contexto, este trabalho buscou avaliar corpos de prova (CPs) contendo estruturas celulares fabricadas em poliamida 12 por Sinterização Seletiva a Laser, buscando investigar os efeitos causados pela redução do volume e do número de células na resistência mecânica dos CPs. Por meio de um DOE, amostras (CPs) com diferentes volumes e quantidade de células foram fabricadas e testadas mecanicamente em ensaios de impacto Charpy e flexão a três pontos, comparando-os com um corpo de prova padrão (sem a presença de estruturas celulares). Os resultados do ensaio de flexão nos CPs com 70% do volume total em relação ao corpo de prova padrão apresentaram menores valores de resistência mecânica com CPs com menor quantidade de células presentes na estrutura. Já os corpos de prova com 50% do volume obtiveram resultados similares independentemente da quantidade de células presentes nos mesmos. Os resultados do ensaio de impacto nos CPs com número de estruturas de 0,066 e 0,100 células por mm<sup>2</sup> apresentaram resultados semelhantes se considerado o desvio padrão tanto nas amostras com 70% do volume quanto nas com 50%. Já os CPs com 0,033 células por mm<sup>2</sup> apresentaram redução significativa da resistência mecânica. As micrografias da região fraturada dos CPs submetidos ao ensaio de impacto sugeriram que a alteração estrutural das amostras afetou a microestrutura das mesmas. A utilização de estruturas celulares irregulares no projeto para manufatura aditiva, apesar de proporcionar liberdade de projeto, requer atenção especial dos projetistas e *designers* para que a estética do produto não comprometa a resistência mecânica requerida para a sua função.

**Palavras-chave:** parametrização. estruturas celulares. diagrama de Voronoi. sinterização seletiva a laser. manufatura aditiva.



## ABSTRACT

There has been an increasing interest in using geometries known as cell structures on the design of parts for additive manufacturing. This alternative has as principle designing parts whose fabrication by additive manufacturing results in the deposition of material, layer by layer, only where it is necessary, in order to manufacture lightweight parts, without compromising its mechanical structure. By using parametrization concepts such as Voronoi diagrams in this design process it is possible to manufacture geometrically complex parts, with the possibility of controlling the compositional variation of its irregular cell structure. Despite these advantages there is little information regarding the effects on the mechanical properties of parts made by additive manufacturing through the inclusion of cellular structures. In this context, this study evaluated test samples (CPs) containing these structures made of polyamide 12 by Selective Laser Sintering, aiming to investigate the effects caused by reduced volume and number of cells in the strength of CPs. Through a DOE, samples (PLCs) with different volumes and number of cells were manufactured and mechanically tested in a Charpy impact test and three points flexural test, comparing them with a standard sample (without the presence of cellular structures). The results of the bending test with the PLCs with 70% of the total volume compared to the standard sample presented lower mechanical strength values with CPs with smaller amount of cells present in the structure. The samples with 50% of the volume obtained similar results regardless of the amount of cells present in them. The results of the impact test with the PLCs of 0.066 and 0.100 cells per  $\text{mm}^2$  structures showed similar results considering the standard deviation both in samples with 70% of the volume and 50%. Meanwhile, the CPs with 0,033 cells per  $\text{mm}^2$  showed significant reduction in mechanical strength. The micrographs of the fractured region of CPs submitted to the impact test showed that the structural change of the samples affected their microstructures. The use of irregular cell structures in the design for additive manufacturing, while providing freedom of design, requires special attention of the designers so that the aesthetics of the product do not compromise the mechanical strength required for its function.

**Keywords:** parametrization, cell structures, Voronoi diagram, selective laser sintering, additive manufacturing



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da informação em processo de manufatura aditiva.....	30
Figura 2 - Desenho esquematizado da sinterização seletiva a laser .....	36
Figura 3 - Esquema da formação dos necks e emaranhamento das cadeias poliméricas. ....	38
Figura 4 - Estrutura química da unidade de repetição (mero) da PA12	39
Figura 5 - Software de personalização do telhado do Mini Cooper .....	43
Figura 6 - Próteses de anca de joelho.....	44
Figura 7 - Aviva Stadium – vista geral externa.....	47
Figura 8 - Passos da concepção geométrica do Aviva Stadium .....	47
Figura 9 - Modelo de imobilizador ortopédico fabricado por MA.....	48
Figura 10 - Linhas do diagrama de Voronoi .....	50
Figura 11 - Método dos Elementos Aplicados ao Voronoi .....	51
Figura 12 - Parte de um cilindro com duas camadas de treliças fabricadas em SL.....	52
Figura 13 - Suporte de dobradiça para o Airbus A320.....	53
Figura 14 - EDAG Genesis .....	54
Figura 15 - Fluxograma da sequência experimental.....	57
Figura 16 - Código de modelagem dos corpos de prova.....	59
Figura 17 - Parte 1 do código de modelagem dos corpos de prova.....	60
Figura 18 - Parte 2 do código de modelagem dos corpos de prova.....	60
Figura 19 - Parte 3 do código de modelagem dos corpos de prova.....	60
Figura 20 - Parte 4 do código de modelagem dos corpos de prova.....	61
Figura 21 - Parte 5 do código de modelagem dos corpos de prova.....	61
Figura 22 - Parte 6 do código de modelagem dos corpos de prova.....	62
Figura 23 - Parte 7 do código de modelagem dos corpos de prova.....	62
Figura 24 - Parte 8 do código de modelagem dos corpos de prova.....	63
Figura 25 - Parte 9 do código de modelagem dos corpos de prova.....	63
Figura 26 - Corpos de prova para ensaio de flexão a três pontos.....	66
Figura 27 - Gráfico de superfície comparativo entre todos os valores da tabela.....	68
Figura 28 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0200 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões .....	69
Figura 29 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0132 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões .....	70

Figura 30 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0066 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões.....	70
Figura 31 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 70% do volume, com os respectivos desvios padrões.....	71
Figura 32 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 50% do volume, com os respectivos desvios padrões.....	71
Figura 33 - Corpos de prova .....	72
Figura 34 - Gráfico de superfície comparativo entre todos os valores da tabela.....	74
Figura 35 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 70% do volume, com os respectivos desvios padrões.....	75
Figura 36 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 50% do volume, com os respectivos desvios padrões.....	75
Figura 37 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,100 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões.....	76
Figura 38 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,066 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões.....	76
Figura 39 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,033 células por mm <sup>2</sup> , com os respectivos desvios padrões.....	77
Figura 40 - Superfície fraturada por impacto Charpy .....	77
Figura 41 - MEV do corpo de prova padrão – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita).....	78
Figura 42 - MEV do corpo de prova de 0,1 células/mm <sup>2</sup> com 70% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita) .....	79
Figura 43 - MEV do corpo de prova de 0,1 células/mm <sup>2</sup> com 50% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita) .....	79
Figura 44 - MEV do corpo de prova de 0,066 células/mm <sup>2</sup> com 70% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita) .....	79



Figura 45 - MEV do corpo de prova de 0,066 células/mm <sup>2</sup> com 50% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita).....	80
Figura 46 - MEV do corpo de prova de 0,033 células/mm <sup>2</sup> com 70% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita).....	80
Figura 47 - MEV do corpo de prova de 0,033 células/mm <sup>2</sup> com 50% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita).....	80



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos processos de MA, de acordo com a ASTM F2792 .....	32
Quadro 2 - Diferenças básicas entre o Projeto para Fabricação e Projeto para Manufatura Aditiva .....	41
Quadro 3 - Fatores impulsionadores da produção personalizada. ....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da poliamida (PA) <i>DuraForm</i> C01.....	56
Tabela 2 - Condições e códigos do delineamento para o ensaio de flexão a três pontos e impacto Charpy .....	58
Tabela 3 - Delineamento experimental para o ensaio de flexão a três pontos e impacto Charpy.....	58
Tabela 4 - Parâmetros de fabricação utilizados na confecção dos corpos de prova.....	64
Tabela 5 - Valores do ensaio de flexão a três pontos referentes às tensões (MPa) necessárias para a deformação .....	67
Tabela 6 - Análise de variância com intervalo de confiança com nível de significância de 0,05 .....	68
Tabela 7 - Valores do ensaio de Impacto Charpy referentes à energia absorvida ( $J \times 10^{-2}$ ). .....	72
Tabela 8 - Análise de variância com intervalo de confiança com nível de significância de 0,05 .....	73



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3DP	Impressão Tridimensional
6D	Hexadimensional
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Manufatura Auxiliada por Computador
CTI	Centro de Tecnologia da Informação
DMLS	Sinterização a Laser Direta de Metais
DMD	Deposição Direta de Metal
EBW	Soldagem por Feixe de Elétrons
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição
FFF	Fabricação por Filamento Fundido
IJP	Impressão à Jato de Tinta
LENS	Fabricação de Forma Final a Laser
LOM	Manufatura Laminar de Objetos
LS	Sinterização a Laser
MA	Manufatura Aditiva
MEAV	Método dos Elementos Aplicados ao Voronoi
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NIMMA	Núcleo de Inovação em Moldagem e Manufatura Aditiva
NURBS	<i>Non Uniform Rational Basis</i>
PA	Poliamida
PLT	Tecnologias com Lâmina de Papel
PPF	Projeto Para Fabricação
PMA	Projeto para Manufatura Aditiva
SI	Sistema Internacional de Unidades
SL	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
SLM	Fusão Seletiva a Laser
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>





## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	OBJETIVOS.....	28
1.1.1	Objetivo Geral.....	28
1.1.2	Objetivos Específicos.....	28
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	29
2.1.1	Classificação dos processos de MA.....	32
2.1.2	Sinterização Seletiva a Laser (SLS).....	35
	Poliamida 12 .....	39
2.2	PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA.....	40
2.3	PRODUÇÃO PERSONALIZADA.....	42
2.4	PARAMETRIZAÇÃO.....	45
2.5	ESTRUTURAS CELULARES.....	49
2.5.1	Propriedades mecânicas das peças com estruturas celulares.....	54
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	MATERIAIS.....	56
3.2	MÉTODOS .....	57
3.2.1	Delineamento dos Experimentos (DOE) .....	57
3.2.2	Modelagem dos corpos de prova .....	59
3.2.3	Impressão dos corpos de prova.....	63
3.2.4	Ensaio e caracterização .....	64
3.2.4.1	Ensaio mecânico de flexão a três pontos .....	64
3.2.4.2	Ensaio mecânico de Impacto Charpy.....	65
3.2.4.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	65
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	66
4.1	ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS.....	66
4.3	RESULTADOS DA MICROSCOPIA.....	77
5.	CONCLUSÃO.....	81
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	83
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICES.....	92

APÊNDICE A - DESENHOS REFERENTES AOS ENSAIOS DE IMPACTO	
CHARPY .....	92
APÊNDICE B - DESENHOS REFERENTES AO ENSAIO DE FLEXÃO A	
TRÊS PONTOS.....	94

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a intensificação da concorrência, aliada ao crescente desafio de aumentar a complexidade dos produtos fabricados, tem exigido das empresas e seus projetistas alterações substanciais no processo de desenvolvimento de produtos. Neste contexto cresce o interesse nos chamados processos de Manufatura Aditiva (MA) ou impressão 3D. Originalmente utilizada para auxiliar os projetistas a avaliar protótipos, visando verificar a forma da peça, mais recentemente, a MA tem sido empregada na produção de peças funcionais, evidenciando seu potencial para a fabricação personalizada de bens de consumo (BERNARD, 1999; ROSEN, 2007). Um dos principais apelos da MA na fabricação de peças funcionais finais é que o seu custo não aumente com a complexidade geométrica da peça, apenas com o seu volume.

Esta técnica de manufatura é por vezes utilizada para simplificar os meios tradicionais de fabricação, mantendo a funcionalidade em peças de produção através da introdução de componentes modulares e ajustáveis (MEAGAN et al., 2013). Os processos de MA oferecem a oportunidade para que sejam repensadas as técnicas projetuais, evidenciando a necessidade de se desenvolver produtos no conceito do Projeto para Manufatura Aditiva (PMA).

A parametrização é um método computacional que pode atuar como um método de exploração das técnicas de projeto. Esta, vinculada ao PMA, permite flexibilidade e personalização na produção industrial. O princípio da personalização em massa é alcançar um resultado especificamente adequado para um projeto individual, baseando-se na combinação de baixo custo unitário de processo de produção em massa com a flexibilidade de adaptação do projeto ao indivíduo ao qual este é projetado.

Neste sentido, o emprego do conceito de estruturas celulares vem sendo considerado como um importante diferencial de projeto, o qual consiste na fabricação da geometria mediante a deposição de material apenas onde se faz necessário (GIBSON, 2010). A principal vantagem atribuída a esse modo de projeto é obter elevada resistência mecânica associada a pouca massa.

Investigar alternativas para a fabricação de peças geometricamente complexas, estruturalmente rígidas e simultaneamente leves é um foco de pesquisa de interesse na área da fabricação. O número reduzido de pesquisas envolvendo estruturas celulares na área

de projeto para manufatura aditiva demanda atenção especial em relação ao ajuste dos parâmetros experimentais, bem como uma avaliação das potencialidades da aplicação destas na área de projeto.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o emprego de estruturas celulares irregulares, como alternativa para aplicação no projeto para manufatura aditiva.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar diferentes configurações de estruturas celulares irregulares variando o volume (massa) e a quantidade de células em corpos de prova fabricados por Sinterização Seletiva a Laser (SLS)
- Avaliar a resistência mecânica dos CPs por meio de ensaios de flexão a três pontos e impacto Charpy e confrontar os resultados em função da configuração volume (massa) x quantidade de células;
- Correlacionar os resultados dos ensaios realizados, avaliando a região de ruptura dos CPs contendo as estruturas celulares por meio da microscopia eletrônica de varredura;
- Avaliar, de forma qualitativa, a utilização do método de diagrama de Voronoi, como alternativa para a modelagem CAD de estruturas celulares fabricadas para a manufatura aditiva pelo processo SLS.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

De acordo com Wolhers (2009), a primeira tentativa em criar objetos sólidos utilizando fotopolímeros e raio laser ocorreu no final da década de 60 no Instituto Battelle Memorial, em Ohio, nos Estados Unidos. A experiência envolveu a intersecção de feixes de laser com diferentes intensidades em um tanque de resina. A partir daí, experiências, patentes e pesquisas tornaram-se importantes para o desenvolvimento destas tecnologias em que a tridimensionalidade e a análise física são necessárias para a conceituação, análise e produção de produtos.

Segundo Buswell et al. (2007), o termo inicialmente utilizado para designar estas tecnologias foi “prototipagem rápida” referindo-o aos métodos de produção de protótipos por sistemas aditivos. Atualmente o termo mais empregado é manufatura aditiva (MA). Existem estudos que tratam a manufatura aditiva unicamente como o processo da sobreposição de camadas de qualquer material com o objetivo de formar um protótipo físico, enquanto outros estabelecem parâmetros e a definem pela utilização de equipamentos que não necessitam da força humana.

O princípio de fabricação pelos processos de MA consiste na sobreposição de camadas de material, até que o objeto tridimensional desejado adquira forma. O uso dessa tecnologia tem a finalidade de criar modelos funcionais, de apresentação, de visualização, para montagem e moldes para ferramentaria (VOLPATO et al., 2007). A técnica de manufatura aditiva consiste no desenvolvimento do produto, a partir de sua modelagem em um sistema CAD 3D. Depois de modelada a peça é seccionada em finas camadas por algoritmos de computador, as fatias são construídas umas sobre as outras, gerando assim o protótipo ou a peça propriamente dita (FERNANDES, 2001).

A figura 1 discrimina detalhadamente as etapas deste processo. Este fluxograma inicia-se pela ideia do produto, com o arquivo digital em CAD do objeto modelado, a seguir, um *software* CAD 3D transformará esse arquivo em um arquivo compatível com o *software* da máquina de MA, através do qual serão adicionadas as informações do processo. O *software* da máquina de MA por sua vez executará esta sequência de informações para a fabricação do objeto.

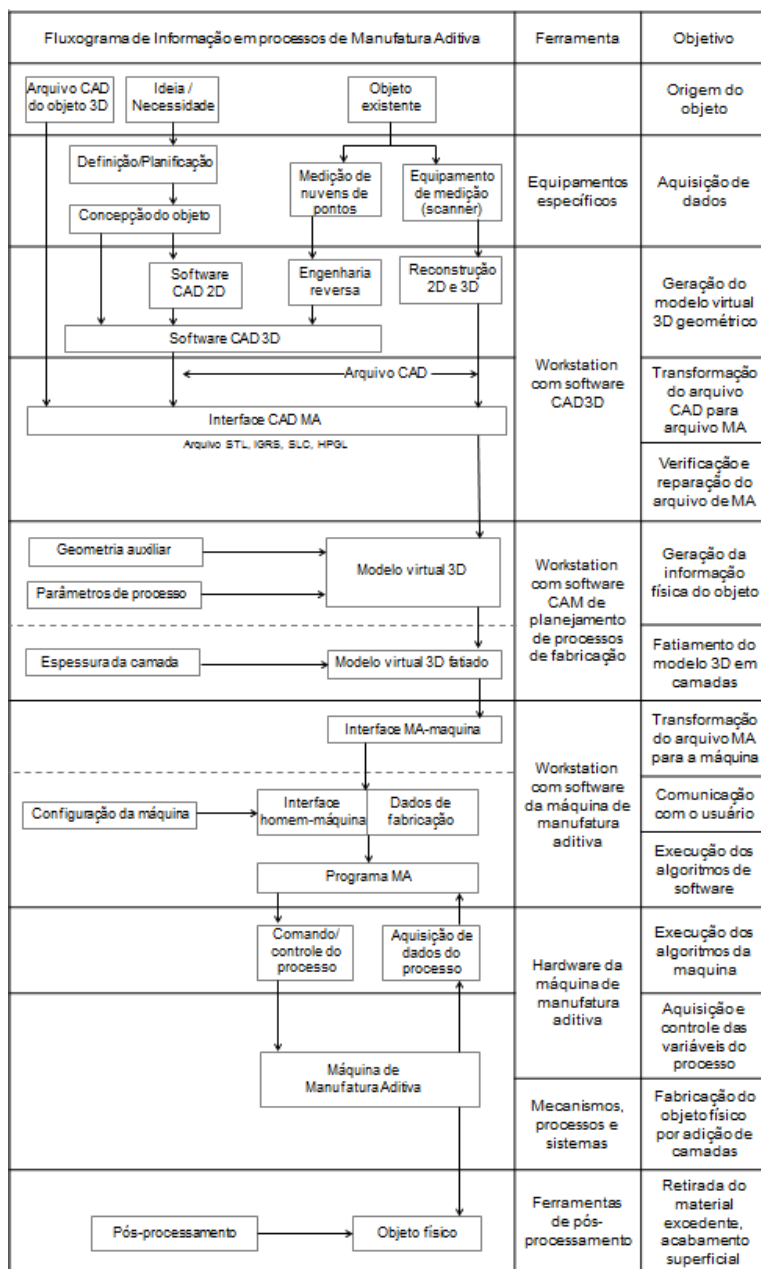


Figura 1 – Fluxograma da informação em processo de manufatura aditiva

Fonte: Ajata (2012)

Uma das maiores vantagens da MA é a possibilidade de criar geometrias de qualquer complexidade sem custo adicional. Os custos incorridos por qualquer técnica de manufatura aditiva são, normalmente, determinados pelo tempo de construção de um volume, que, por sua vez, é dado pela orientação na qual o componente é construído. Convencionalmente, a manufatura aditiva é utilizada na produção de peças cujo objetivo principal é o conceito de demonstração das mesmas como protótipos. Segundo Bernard et al. (1999), devido à sua natureza, a MA é adequada para a fabricação de produtos heterogêneos.

De acordo com Meteyera (2014), nas últimas décadas, a manufatura aditiva tem atraído cada vez mais a atenção da indústria mundial, tendo três vantagens principais:

- Fabricação de forma livre: a MA remove as restrições da manufatura tradicional e possibilita uma liberdade de projeto para um produto inovador.
- Cadeia de fornecimento curta: a MA pode reduzir a cadeia de fornecimento da fabricação e aumentar o lucro para os fabricantes.
- Manufatura sustentável: a MA tem potencial para reduzir o impacto ambiental que as técnicas tradicionais de manufatura normalmente causam.

Segundo Hague, Campbell e Dickens (2003), processos de manufatura aditiva são utilizados de forma rotineira para a produção de protótipos técnicos e funcionais, de visualização e modelos de comercialização. Durante anos, projetistas têm sido restritos quanto ao que podem produzir por geralmente deverem projetar para a manufatura industrial tradicional. Ainda conforme Hague, Campbell e Dickens (2003), os projetistas foram ensinados a projetar objetos que podem ser desenvolvidos facilmente utilizando as tecnologias tradicionais. A ocorrência disto se dá devido às limitações da geometria impostas pelos processos de manufatura tradicionais.

### 2.1.1 Classificação dos processos de MA

Desde que surgiram, os processos de MA foram classificados de diferentes maneiras, como em função do nome atribuído pelo fabricante ou em função do estado da matéria-prima empregada. Atualmente a norma ASTM F2792 classifica os processos de MA com base no princípio de consolidação das camadas, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos processos de MA, de acordo com a ASTM F2792  
Fonte: Adaptado de GAO et al., 2015

Princípio	Tecnologia	Matéria prima	Fonte de energia	Características gerais
Extrusão de filamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelagem por fusão e deposição (FDM);</li> <li>• Fabricação por filamento fundido (FFF)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termoplásticos;</li> <li>• Argilas;</li> <li>• Cerâmicas;</li> <li>• Pastas metálicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquina de extrusão de baixo custo;</li> <li>• Impressão multimaterial;</li> <li>• Resolução limitada da peça;</li> <li>• Baixa qualidade superficial</li> </ul>
Fusão em leito de pó	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinterização seletiva a laser (SLS);</li> <li>• Sinterização direta de metais a laser (DMLS);</li> <li>• Fusão seletiva a laser (SLM);</li> <li>• Fusão por feixe de elétrons (EBM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros;</li> <li>• Metal atomizado em pó;</li> <li>• Pó cerâmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feixe de laser de alta energia;</li> <li>• Feixe de elétrons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bons detalhes e precisão;</li> <li>• Peças com alta densidade;</li> <li>• Alta rigidez e resistência;</li> <li>• Manipulação do pó e reciclagem;</li> <li>• Estruturas de ancoragem e suporte</li> </ul>
continua				



<b>Princípio</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Matéria prima</b>	<b>Fonte de energia</b>
Fotopolimerização em cuba	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esterolitografia (SL)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotopolímeros;</li> <li>• Cerâmicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luz ultravioleta</li> </ul>
Jateamento de material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impressão a jato de tinta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fotopolímeros;</li> <li>• Ceras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia térmica;</li> <li>• Cura por luz</li> </ul>
Jateamento de aglutinante	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impressão a jato de tinta indireto (Binder 3DP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pó polimérico;</li> <li>• Pó cerâmico;</li> <li>• Pó metálico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energia térmica</li> </ul>
Adição de laminados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manufatura de objeto por laminação (LOM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filme plástico;</li> <li>• Folha metálica;</li> <li>• Fita cerâmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feixe de laser</li> </ul>
Deposição direta de energia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fabricação da forma final a laser (LENS);</li> <li>• Deposição direta de metal (DMD)</li> <li>• Soldagem por feixe de elétrons (EBW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pó metálico fundido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feixe de laser</li> <li>• Feixe de elétrons</li> </ul>
conclusão			

De acordo com Wholers (2009), dentre as diversas técnicas empregadas na manufatura aditiva as mais utilizadas recentemente são:

- Impressão a jato de tinta: trata-se de tecnologia que utiliza o princípio de jateamento de material para fabricar diretamente o objeto de interesse (protótipo, modelo ou peça). Durante a construção o processo requer o emprego de diferentes resinas: uma para o objeto e outra para o suporte (normalmente uma resina solúvel em água) (LOZO et al., 2008). A precisão deste sistema está em torno de 300 e 200 dpi nos eixos X e Y, respectivamente, porém o material utilizado não é resistente o suficiente para utilização em modelos para testes funcionais, direcionando-o para a área de modelagem conceitual (RYDER, 2002). A impressão a jato de tinta apresenta baixo custo, é aplicável ao processamento de grande área, é compatível com substratos flexíveis.

- Estereolitografia: é um processo de MA cujo princípio de consolidação das camadas é mediante a fotopolimerização por fonte de luz UV emitida por laser. O equipamento para a estereolitografia constitui-se de um reservatório (cuba) contendo resina fotossensível, e de uma plataforma móvel na qual a peça vai sendo fabricada e, que pode se deslocar no interior do reservatório, submergindo após a solidificação de cada camada. Esta plataforma se movimenta na direção vertical, à medida que o equipamento faz a leitura das camadas individualmente (CHEACH, 1997 – parte I). Um conjunto de espelhos galvanométricos direciona o feixe de laser para traçar as seções transversais do modelo sobre a superfície da resina fotocurável, contida no reservatório, solidificando o material. Após a conclusão, esta é submetida a uma etapa de pós-processamento, onde é realizada a limpeza da peça para a retirada de excesso de resina, pós-cura por radiação ultravioleta e/ou térmico e operações de acabamento superficial.

- Modelagem por fusão e deposição: a tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) utiliza principalmente o material plástico ABS e policarbonatos em forma de filamentos. Estes são tracionados para um cabeçote contendo um bico extrusor, responsável por aquecer o material até uma viscosidade adequada

para deposita-la na base (plataforma) de construção também em filamentos. Assim, o modelo vai sendo fabricado camada por camada, até se completar. O cabeçote de extrusão aquecido movimenta-se nos eixos X e Y, enquanto a base, onde a peça será construída, movimenta-se no eixo Z. Na medida em que o filamento de material, se deposita e solidifica, aderindo-se à camada anterior gera na peça um acabamento superficial de qualidade bastante inferior, pela presença de ondulações (PAGGI, 2008).

- Sinterização Seletiva a Laser: esta tecnologia utiliza o princípio de fusão em leito de pó. Por ser esta a tecnologia utilizada no desenvolvimento experimental deste trabalho, esta será apresentada em maiores detalhes no item 2.1.2.

### **2.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)**

O processo de sinterização seletiva a laser é uma das mais comuns e mais utilizadas técnicas de manufatura aditiva existentes no mercado. O processo foi desenvolvido em 1987 na Universidade do Texas, em Austin, nos Estados Unidos. Este sistema utiliza um laser de CO<sub>2</sub> para sinterizar o material (pó), camada por camada, até que o modelo esteja totalmente construído.

Com o auxílio de um sistema óptico o feixe de laser é projetado contra a plataforma de construção, sinterizando ou fundindo o material de acordo com a geometria da camada gerada na etapa de fatiamento do STL. Após a construção da primeira camada, a plataforma é deslocada para baixo a uma distância igual à espessura da próxima camada e uma nova quantidade de material é depositada sobre a parte sinterizada. Uma vez atingida a temperatura de trabalho, o laser inicia a construção da segunda camada e assim sucessivamente até a fabricação total da peça (VOLPATO, 2007). De acordo com Kulman (2006), a energia transferida ao pó pelo laser deve ser suficiente para sinterizar ou fundir o material e também para promover a aderência entre as camadas. Por isso é essencial a utilização de diferentes tipos de laser com a quantidade de energia necessária para a sinterização de diferentes tipos de materiais. Como mostrado na figura 2, o processo de SLS, não necessita da construção de suportes de camada durante o processamento das peças.

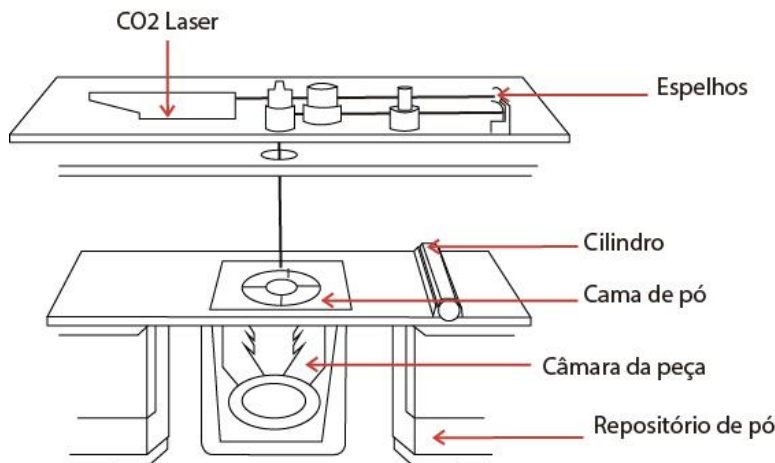


Figura 2 - Desenho esquematizado da sinterização seletiva a laser

Fonte: Autora

De acordo com Kang (2005), a sinterização é utilizada para a produção de peças com densidade e microestrutura controladas. As variáveis de processo por sua vez estão diretamente relacionadas às propriedades do pó, sendo estas (GIBSON, 2010; LÜ, FUH E WONG, 2001; PAGGI, 2008):

- **Densidade de energia:** é a medida de energia fornecida pelo laser por unidade de área, sendo influenciado pela potência do laser, diâmetro do feixe e velocidade de varredura (PAGGI, 2008). Cada camada da peça é sinterizada pela combinação dos parâmetros citados acima. Ainda de acordo com Paggi (2008), se o feixe de laser estiver se deslocando em baixa velocidade, o material pode sofrer empenamento ou sofrer o processo de degradação devido ao superaquecimento. Porém uma elevada velocidade do feixe de laser poderá não sinterizar a camada por completo.
- **Temperatura de pré-ativação:** é a temperatura na qual a plataforma de construção se mantém, sendo determinante para obter-se a sinterização desejada do material. Segundo Caulfield et al. (2007), a plataforma deve ser mantida entre 10 e 20°C abaixo da temperatura de fusão do material cristalino, ou acima da temperatura de transição vítrea, no caso de materiais amorfos.

- Estratégias de construção: segundo Paggi (2008), é o modo como o feixe de laser percorre a camada para a sinterização do material. Diferentes trajetórias podem ocasionar distintas taxas de transferência de calor, o que pode alterar a espessura da camada fundida, causando mudanças nas propriedades mecânicas das peças.
- Atmosfera: a atmosfera gasosa no interior da câmara na qual o material é mantido durante o processamento é controlada devido a possíveis reações entre o material e o ar. De acordo com Oliveira et al. (2007), os equipamentos atualmente disponíveis em mercado operam com atmosfera de nitrogênio, argônio ou a mistura de ambos.
- Espessura de camada: esta interfere na qualidade da peça final. De acordo com Kulman (2006), erros dimensionais de cada camada serão somados na construção final da peça alterando diretamente a altura desta, como também propriedades mecânicas, acabamento de superfície e resolução de detalhes.
- Características das partículas: a forma da partícula, a distribuição granulométrica do pó e as suas características superficiais são fatores importantes no processo de sinterização, influenciando a densidade e escoamento do pó (PAGGI, 2008).

De acordo com Narkis e Rosenzweig (1995), na sinterização de polímeros são observados quatro eventos, sendo estes: (1) Microfusão localizada (locais de contato); (2) Crescimento dos contatos (*necks*), (3) Transporte do material por fluxo viscoso; e (4) Emaranhamento entre as cadeias poliméricas de partículas adjacentes. Segundo Paggi (2008), as partículas de pó adjacentes recebem energia do feixe de laser e têm suas moléculas excitadas, proporcionando a fusão nas áreas de contato e consequentemente assim a formação dos *necks*, os quais terão seus diâmetros aumentados de acordo com a evolução do processo de sinterização, após a formação destes é verificado então o transporte do material por fluxo viscoso. As cadeias poliméricas no estado fundido se emaranham com outras cadeias (Figura 3), garantindo a rigidez mecânica do *neck* após seu resfriamento.

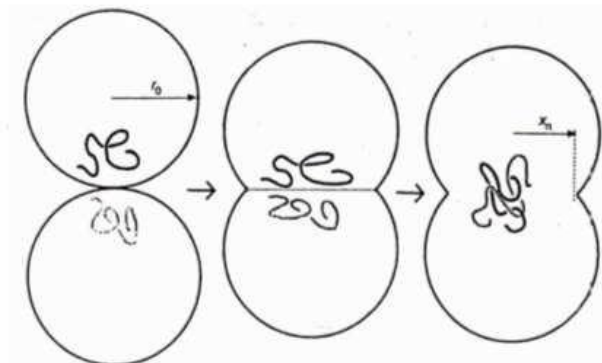


Figura 3 - Esquema da formação dos necks e emaranhamento das cadeias poliméricas.

Fonte: Narkis e Rosenzweig (1995)

As vantagens do processo de SLS estão relacionadas à capacidade de fabricar objetos usando uma grande variedade de materiais. Em princípio qualquer pó que possa ser sinterizado ou unido sem fundir, pode ser utilizado. Segundo Volpato et al. (2007), dentre esses materiais estão os polímeros termoplásticos, os elastômeros, as cerâmicas e os metais. De acordo com Leite (2007), entre as vantagens do processo de SLS também se encontram: (1) Não necessitar estruturas de suporte adicional; (2) Precisão alcançada; (3) Elevada velocidade de fabricação; e (4) Completa automação dos processos de fabricação (STEEN E MAZUMDER, 2010). Já de acordo com Chua, Leong e Lim (2004), entre as desvantagens do processo encontram-se: (1) Elevadas dimensões do sistema de fabricação; e (2) Grande consumo de energia requerido.

As aplicações da sinterização seletiva a laser podem variar entre a indústria aeroespacial, medicina ortodôntica, aparelhos de audição, indústria automobilística, *design* de calçados, moldes para injeção de baixo volume de peças, entre outros. Às peças fabricadas são atribuídas boa precisão dimensional e durabilidade, no entanto, duas desvantagens principais podem ser limitadoras quanto ao uso desta tecnologia: acabamento da superfície pode eventualmente conter poros que podem causar infiltrações; e alto custo do equipamento.

Entre os materiais poliméricos mais empregados destaca-se a poliamida 12, cujas principais características são apresentadas a seguir.

## Poliamida 12

Existem diversos tipos de poliamidas e suas propriedades variam de acordo com a quantidade de carbono presente em sua estrutura (PAGGI, 2008). Algumas características são comuns aos diferentes tipos deste polímero, sendo estas: (1) Elevada resistência ao impacto; (2) Elevada resistência mecânica; e (3) Moderada dureza.

Comparando-a com outros polímeros, as poliamidas apresentam temperatura de processamento elevada, porém diferentemente das demais poliamidas, a poliamida 12 apresenta temperatura de fusão relativamente baixa, na ordem de 180 a 187°C. Outra característica deste material é a baixa absorção de umidade, devido ao alto número de carbono presente em sua cadeia (Figura 4). Estas características atribuem propriedades favoráveis à utilização da PA12 no processo de sinterização seletiva a laser, uma vez que esta apresenta atributos especiais como elevada resistência quando exposta a ambientes agressivos, excelente acabamento de superfície com indicação para fabricação de peças complexas (3D SYSTEMS, 2015).

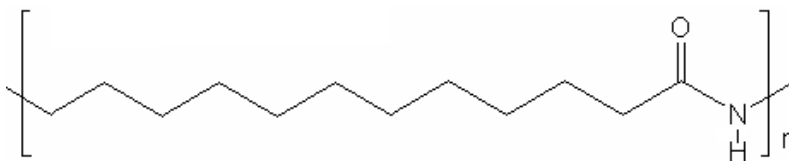


Figura 4 - Estrutura química da unidade de repetição (mero) da PA12

Fonte: Paggi (2008)

## 2.2 PROJETO PARA MANUFATURA ADITIVA

De acordo com Tomiyama (2009), a metodologia de projeto é um modelo de processo de projeto o qual é utilizado no desenvolvimento de produtos. Este processo de desenvolvimento segue uma sequência lógica de fases, e embora existam diferenças entre modelos metodológicos e suas utilizações, todos mostram de uma maneira semelhante o desenvolvimento do processo projetual através de uma sequência de eventos.

No projeto para fabricação (PPF), duas diretrizes principais muitas vezes são consideradas para reduzir dificuldades, tempo de montagem e custo: (1) minimizar o número de peças e (2) eliminar elementos de fixação. Ambas as considerações traduzem diretamente a um número menor de operações de montagem. Para minimizar o número de peças e elementos de fixação, o projeto torna-se muito mais complexo e oneroso para a fabricação. No entanto, de acordo com Gibson et al. (2010) as tecnologias de manufatura aditiva oferecem a oportunidade para se repensar o PPF.

No projeto para manufatura aditiva (PMA) o projetista se preocupa com a exploração de espaços, ao invés de focar nas restrições impostas pelos processos de fabricação. Estes normalmente significam a adaptação dos projetos pelos projetistas para eliminar as dificuldades de produção e minimizar os custos (GIBSON et al., 2010).

Para Campos (2007), o emprego de modelos ou protótipos auxilia no desenvolvimento do projeto desde sua concepção até a tomada de decisão. Estas ferramentas de projeto são analisadas para mostrar suas principais implicações na forma, funcionalidade, geometria e características estéticas dos produtos. Ainda segundo Campos (2007), o PMA tem um impacto direto ou indireto em diversos fatores de produtos, os quais são aspectos geométricos, estéticos, funcionais, econômicos e de qualidade.

Um projeto de engenharia geralmente compreende o conhecimento das propriedades dos materiais, tolerâncias, montagem e fabricação. Várias diretrizes são baseadas em limites ou restrições do processo de fabricação. Para exemplificar, o Quadro 2 mostra algumas das diferenças entre projeto para fabricação de peças de plástico moldadas por injeção e projeto para manufatura aditiva.



Quadro 2 - Diferenças básicas entre o Projeto para Fabricação (peças de plástico moldadas por injeção) e Projeto para Manufatura Aditiva

Fonte: Campos (2007)

<b>Projeto para Fabricação</b>	<b>Projeto para MA</b>
Considerações devem ser feitas em relação à espessura da parede. Paredes mais finas solidificam antes, portanto paredes uniformes são preferidas.	Devido à utilização de moldes não ser necessária não há a necessidade de paredes uniformes. A espessura pode variar de 0,001 mm para mais e pode variar livremente.
Evitar cantos vivos para reduzir a concentração de tensão durante a moldagem.	Não há estresse encontrado nos processos de MA, mas algumas geometrias podem necessitar de suportes.
Os ângulos de saída devem ser considerados para facilitar a desmoldagem da peça do molde	Não são necessários ângulos de saída.
Evitar formas reentrantes e superfícies em que há a necessidade da utilização de mecanismos extras de desmoldagem da peça.	Formas reentrantes são possíveis. Dependendo do processo de MA pode ser necessário projetar suportes de sustentação da peça.
A linha de partição deve ser posicionada no lado mais uniforme da peça. Há a necessidade de um software especial ou mão-de-obra especializada.	Não há a necessidade de linha de partição.
Preferência sempre pela peça simétrica. Geometrias mais complexas significam custos mais altos e maior tempo de manufatura.	Geometrias mais complexas requerem maior tempo de projeto, mas o tempo de produção não é alterado.

Embora a MA apresente restrições, estas geralmente não comprometem a geometria do produto ou a intenção original do projeto. No entanto, tende a influenciar nas propriedades do produto, desempenho, custo e produtividade. De acordo com Gupta (1997), o PMA considera tanto os objetivos do projeto quanto as restrições de produção, a fim de identificar problemas de fabricação, enquanto as peças estão sendo projetadas.

## 2.3 PRODUÇÃO PERSONALIZADA

Conforme já evidenciado, o projeto para fabricação normalmente implica que os projetistas devem adaptar seus projetos para eliminar as dificuldades de produção e minimizar o custo de fabricação, montagem e logística. No entanto, os recursos de tecnologias de manufatura aditiva proporcionam uma oportunidade para repensar o PPF para aproveitar as capacidades únicas destas tecnologias, por exemplo, na aplicação de conceitos de customização.

Sendo a produção personalizada eficiente em termos de custo dos produtos e serviços sob medida para as necessidades de um cliente (LEVY, 2001; PINE,1993). Pelegrini (2005) considera, conforme o Quadro 3, fatores impulsionadores da produção personalizada.

Quadro 3 - Fatores impulsionadores da produção personalizada.

Fonte: Pelegrini (2005)

Macro- Dinâmicas	Agentes de Mudança
Mercados globais dinâmicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento do comércio internacional</li> <li>• Novas relações econômicas</li> <li>• Queda de fronteiras comerciais</li> <li>• Descentralização dos sistemas de produção</li> </ul>
Fragmentação dos mercados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surgimento de novos nichos de mercado</li> <li>• Diversificação da demanda e da oferta</li> <li>• Novas necessidades e desejos de consumo</li> <li>• Novas subculturas e estilos de vida</li> <li>• Rápidas mudanças de tendências</li> </ul>
Novas tecnologias e métodos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema CAE/ CAD/ CAM</li> <li>• Sistemas flexíveis de manufatura</li> <li>• Sistemas de tecnologia da informação</li> <li>• <i>Just-in-time</i></li> <li>• Produção enxuta</li> <li>• Novos métodos de gestão operacional</li> <li>• Modularização</li> </ul>
Redução do ciclo-de-vida do produto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento da velocidade de introdução de novas tecnologias</li> <li>• Redução do tempo de projeto e desenvolvimento de novos produtos</li> <li>• Aumento da demanda por novos produtos</li> <li>• Aumento da concorrência</li> </ul>

A manufatura aditiva permite resultados variáveis, induzindo ao conceito de produção personalizada e permitindo o desenvolvimento de sistemas construtivos não padronizados através de diferenciações seriais e variações digitalmente controladas (KOLAREVIC, 2005). A fabricação de elementos personalizáveis é possível em número reduzido se comparado com técnicas de produção em série.

As competências fundamentais da produção personalizada são a capacidade de identificar os atributos do produto ao longo das necessidades dos clientes, a capacidade de reutilizar ou recombina recursos organizacionais. Para Lampel e Mintzberg (1996) a personalização do produto pode ocorrer em várias etapas ao longo da cadeia de valor, como projetar para encomendar ou montar para encomendar. Segundo Duarte (2007), na produção personalizada a linha de montagem pode criar inúmeras variações do mesmo grupo de produtos. Assim, a atual produção de produtos tende a evoluir para a produção de produtos personalizados. Muitas das atuais tentativas de integração entre um ambiente de projeto e o seu processo de fabricação ainda não se assemelham ao que realmente representa a produção personalizada.

Alford et al. (2000) distinguiu entre produção central, opcional e da forma em relação às estratégias de produção personalizada no setor automotivo e, apesar de argumentar que a personalização ocorre na fase de distribuição neste setor, esta ainda preocupa-se com a mudança da forma do produto. Um exemplo da produção personalizada neste setor é exploração do mercado de pós-venda feita pela BMW com personalização do veículo Mini Cooper (Figura 5).

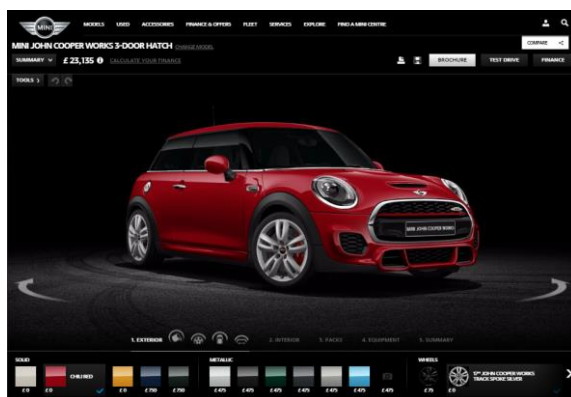


Figura 5 - Software de personalização do telhado do Mini Cooper  
<https://www.mini.co.uk>

Em se tratando de produtos para a área médica, de acordo com Petrovic et al. (2012), empregar o princípio da manufatura aditiva na fabricação de implantes personalizados permite recuperar facilmente os dados do paciente. A personalização de implantes é especialmente importante em próteses de longa duração, uma vez que a geometria do implante necessita se adaptar perfeitamente à anatomia e lesão do paciente (Figura 6). Em outras palavras, o tamanho e peso da prótese deve ser o estritamente necessário para cada paciente, buscando o melhor nível de conforto.

Ainda de acordo com Petrovic et al. (2012), o uso de implantes personalizados possibilita que o cirurgião crie apenas o espaço mínimo necessário, a fim de se ajustar o implante e deixar intacto o tecido ósseo para revisões futuras. De acordo com a lei de Wolff (Wolff, 1986), o osso em um indivíduo saudável ou animal irá remodelar em resposta às cargas que é colocada sobre ele. Portanto, se a carga do osso diminui, o osso se torna mais fraco e menos denso, porque não há nenhum estímulo para a remodelação contínua que é necessária para manter a massa óssea.

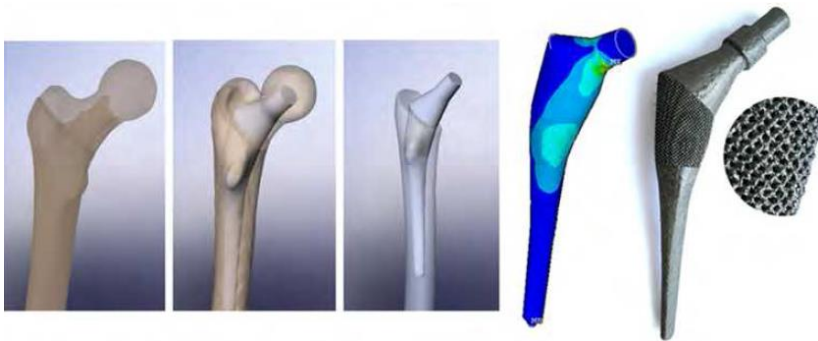


Figura 6 - Próteses de anca de joelho  
Fonte: Petrovic et al. (2012)

Apesar das companhias poderem se beneficiar dos conceitos da personalização em massa, poucas o fazem por não conseguirem alinhar os conceitos desta ao empreendimento em questão às necessidades dos clientes.

## 2.4 PARAMETRIZAÇÃO

De acordo com Alvarado e Muñoz (2012), o termo "projeto parametrizado" associa a ação de projetar pela a adição de parâmetros, e a palavra "parâmetro" se refere aos limites de uma ação, seja numérica ou qualitativa. Desenho paramétrico é, portanto, o processo de desenvolvimento de um modelo através de relações controladas por variáveis. Alterações nestas variáveis resultam em modelos alternativos, e a seleção de uma solução é, então, realizada com base em alguns critérios que podem estar relacionados com o desempenho, facilidade de construção, orçamento, estética ou a combinação destes (HUDSON, 2010).

Alterações no projeto são encontradas com frequência no processo de desenvolvimento de produtos, porém estas são complexas quando se trata de projetos multidisciplinares. Muitas das alterações se propagam para as áreas próximas, afetando todo o conjunto de peças do produto, fazendo necessário o reprojeto de ambas as peças para um produto final fisicamente válido. Segundo Matcha et al. (2008), para empregar este método de projeto, o objeto deve ser descrito por um conjunto de regras de dependências geométricas e restrições que são, então, traduzidas em um modelo paramétrico digital. Geralmente, a forma do desenho paramétrico é moldada por valores de parâmetros e equações que são utilizadas para descrever as relações entre as formas. Assim, as interdependências entre as formas podem ser estabelecidas e seu comportamento pode ser definido matematicamente e geometricamente (STAVRIC E MARINA, 2011).

Moussavi (2011) declara o design paramétrico como um estilo próprio de eliminação das restrições de parâmetros externos e promove a autonomia das formas projetuais, ao mesmo tempo em que não pode avançar para além de novas formas de moldar a matéria para produzir espaços inesperados.

Sistemas paramétricos podem ser classificados em duas categorias: (1) linguística e (2) biológica. A linguística é baseada na gramática, onde um conjunto de regras de composição (sintaxe) governa e molda o projeto (semântica). Projetos de sistemas paramétricos biológicos, por outro lado, adotam uma diferente estratégia generativa, que leva a natureza e os organismos vivos complexos como precedentes e aplica seus princípios na derivação e transformação da forma projetual (HENSEL et al., 2010).

Terzidis (2011) argumenta que a estratégia indutiva de algoritmos pode explorar processos paramétricos ou simular fenômenos complexos. Algoritmos podem ser considerados como as extensões do cérebro humano. Podem também gerar computacionalmente e manipular entidades de projeto como forma geométrica, variáveis de projeto, estruturas de dados que contêm entidades numéricas ou geométricas, expressões matemáticas e operações lógicas. Esse controle sobre o projeto em uma modelagem 3D permite que os projetistas estendam funcionalidades, ou analisem determinadas condições para responder apropriadamente (GÜRSEL 2012).

De acordo com Jester (2014), os princípios do projeto parametrizado são:

- Parametrização intra-articulada: todos os elementos do projeto estão ligados por meio de parâmetros. Como um elemento é manipulado afetará àqueles com os quais também está conectado.
- Parametrização acentuada: aumenta o sentido de integração por meio da diferenciação acentuada, criando uma articulação com mais informações visuais de orientação. Cada painel e segmento da estrutura é diferente, e deve ser fabricado individualmente.
- Parametrização figurada: variações quantitativas na área de projeto criam mudanças qualitativas na estética. Esta é conseguida através de dados de entrada para o código de parametrização.
- Parametrização em resposta: conexão entre o projeto existente e o contexto envolvente permite um design dinâmico que responde ativamente às mudanças no ambiente construído.

Um exemplo de resultado de um projeto parametrizado é o Aviva Stadium (Dublin, na Irlanda) (Figura 7). Trata-se de um estádio esportivo projetado pela Populous Engenharia juntamente com o Buro Happold Esta foi a primeira edificação projetada utilizando softwares de modelagem paramétrica (HUDSON, SHEPHERD E HINES, 2010). A figura 8 ilustra os passos da concepção geométrica da forma do estádio.



Figura 7 - Aviva Stadium – vista geral externa  
Fonte: BuroHappold Engineering

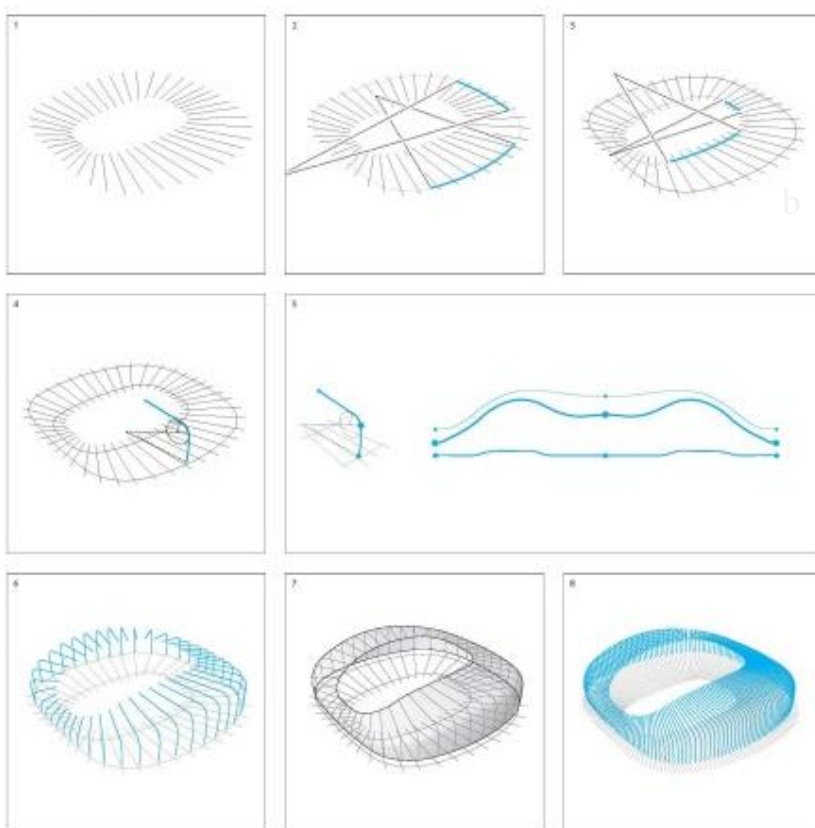


Figura 8 - Passos da concepção geométrica do Aviva Stadium  
Fonte: Gürsel (2012)

O córtex projetado pela Victoria University of Wellington pelo estudante Jake Evill, utiliza o raio-X e a digitalização 3D da área de uma fratura sofrida por um paciente para gerar um modelo sob medida de um imobilizador ortopédico. A estrutura do imobilizador é um exemplo de estrutura celular aplicada ao projeto de produto de forma parametrizada (Figura 9). Neste caso, as duas peças que compõem o imobilizador foram impressas por sinterização seletiva a laser em poliamida. Posteriormente ambas foram unidas, por meio de grampos, ao braço do paciente, os quais só podem ser abertos em hospitais respeitando o processo de cura normal feito pelo gesso. A vantagem do imobilizador contendo estruturas celulares em relação aos métodos convencionais de imobilização de área fraturada é a possibilidade de ventilação e limpeza do local, impedindo que ocasione coceira ou odor ruim.

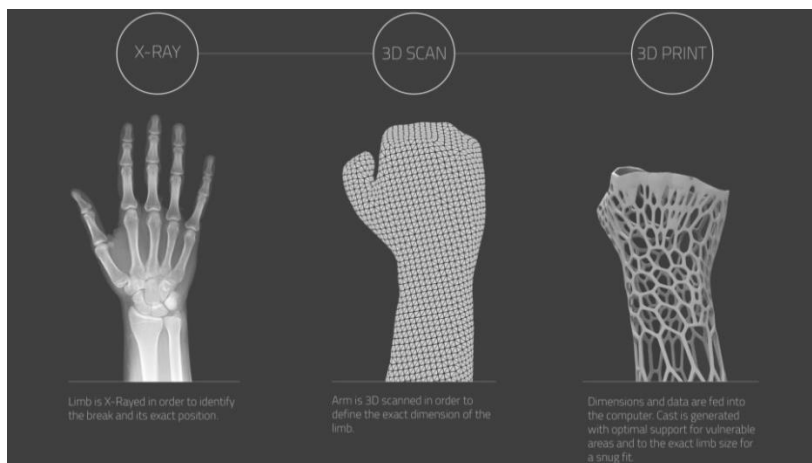


Figura 9 - Modelo de imobilizador ortopédico fabricado por MA

Fonte: <http://www.evilldesign.com/cortex>

A utilização de conceitos de parametrização oferece aos projetistas a possibilidade de testar variações do projeto e fornecem adaptabilidade ao produto. Os métodos de projeto paramétrico e produção personalizada podem não só aumentar a criatividade de projeto e estender as capacidades de concepção e produção, mas também melhorar o produto final (MATCHA et al., 2008). Ainda de acordo com Matcha et al. (2008), programas CAD de modelagem paramétrica são amplamente utilizados na indústria automobilística, naval e aeronáutica, onde o processo de planejamento caracteriza-se por um maior desenvolvimento e otimização de um produto.



## 2.5 ESTRUTURAS CELULARES

Para atingir o novo conceito de PMA e permitir uma ampla gama de novas aplicações, novas abordagens, métodos e ferramentas têm sido apontadas como necessárias. Gibson et al. (2010) sugerem o emprego de estruturas celulares no projeto para manufatura aditiva por estas oferecem flexibilidade de projeto, motivado pelo desejo de depositar material apenas onde se faz necessário. De acordo com Pietroni et al. (2014), uma alternativa para a modelagem de estruturas celulares é empregar Diagramas de Voronoi. Estes consistem em geometrias tipicamente encontradas na natureza, relacionados, em vários casos, a estruturas leves e fortes. Por exemplo, ossos têm a estrutura porosa semelhante a estes diagramas (LU et al., 2014).

De acordo com Ajdari (2008), do ponto de vista da engenharia mecânica, estruturas celulares aumentam a gama de propriedades disponíveis. Sólidos celulares têm propriedades físicas, mecânicas e térmicas que são medidas pelos mesmos métodos que os utilizados para os sólidos completamente densos. A principal vantagem oferecida por estas estruturas é a de uma alta resistência mecânica, mesmo para uma forma geométrica que apresenta uma massa relativamente baixa. À esta solução, aplicada na arquitetura e engenharia, são atribuídas boas características de absorção de energia e boas propriedades de isolamento térmico e acústico (GIBSON E ASHBY, 1997). Neste conceito de estruturas celulares estão incluídas geometrias tipo espumas, favos, treliças e construções similares.

Estas estruturas formadas pelas células de Voronoi podem ser definidas por pontos, com uma distribuição arbitrária, criando elementos de mosaico que se adaptam às geometrias complexas (BENI, 2010). Para Mioc (2012), o diagrama de Voronoi oferece o mais inteligente, realista e semanticamente rico modelo para a representação espacial. Em seu modelo, para conjuntos de pontos e os segmentos de linha, todas as operações sobre a sua estrutura de dados são reversíveis (Figura 10).

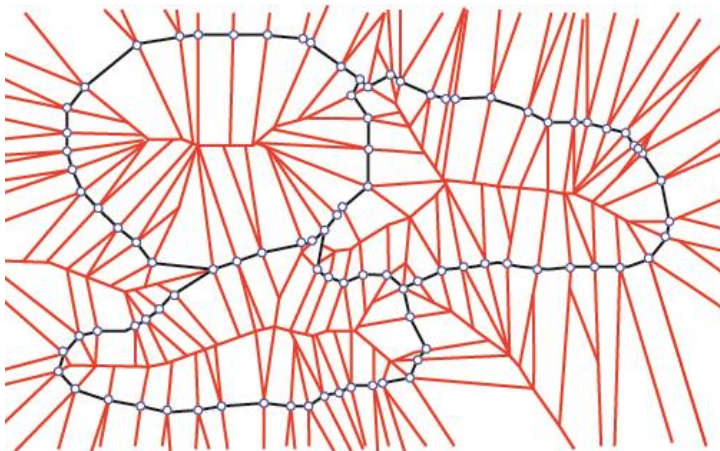


Figura 10 - Linhas do diagrama de Voronoi  
Fonte: Mioc (2012)

Silva e Gibson (1997), usaram o método dos elementos finitos para modelar uma distribuição aleatória Voronoi 2D de células e descobriram que as relações entre os favos não periódicas são, em média, semelhantes daquelas para os favos de mel periódicas. O diagrama de Voronoi é uma estrutura de preenchimento de espaço que é modular, mas não repetitiva e, implicitamente, introduz o conceito de relações espaciais através das adjacências do teorema de Voronoi. No entanto, a geometria real do poliedro de Voronoi é difícil de prever e controlar, já que a forma de uma célula é sempre dependente da configuração de toda a vizinhança. A geometria e da topologia do poliedro - como tamanho, proporção ou o número de arestas - de cada célula é altamente sensível à menor mudança de posição de qualquer ponto de sua periferia (FRIEDRICH et al., 2007). Cada célula pode ter um número arbitrário de vizinhos cujas conectividades com a célula dada são claramente definidas e podem ser explicitamente recuperadas se necessário. Além disso, o diagrama de Voronoi dinâmico oferece a possibilidade de edição local e manipulação do mosaico. Isto é normalmente necessário para o refino do mosaico sem que haja a necessidade de reconstrução de toda a sua malha (BENI, 2010).

A definição de projetar mediante o uso de estruturas celulares considera que dado um conjunto de pontos em um plano, pode-se desenhar uma célula em torno de cada ponto, de tal modo que a célula de cada ponto é a porção do plano que consiste de todas as localizações mais próximas daquele ponto do que de qualquer um dos demais pontos.

A figura geométrica resultante é chamada de mosaico de *Dirichlet*. (SCHOENBERG et al., 2003). As diferenças de resistência encontram-se na natureza da deformação do material: a treliça é regulada por flexão da parede celular, enquanto que os elementos de treliça esticam e comprimem o material (DESHPANDE et al., 2001).

Exemplos de outras propriedades geométricas básicas do *mosaico de Dirichlet* são as de que cada limite da célula é um polígono convexo, cada vértice é o circuncentro dos pontos cujas células compartilham o vértice e o número médio de segmentos por célula não pode ser superior a seis (OKABE et al., 2000).

Ainda de acordo com Okabe et al. (2000), cada elemento de forma é baseado na disposição de Voronoi. Para representar o domínio físico com o elemento de Voronoi, em primeiro lugar, nós dos elementos são dados no espaço dentro do domínio. Em seguida, todos os locais no domínio físico estão associados com o membro mais próximo do conjunto de elemento nodal com relação a distância euclidiana. Uma região gerada por um ponto nodal representa um elemento de Voronoi.

Segundo Worakanchana e Meguro (2008), utilizando o Método dos Elementos Aplicados ao Voronoi (MEAV) (Figura 11), os nós do elemento podem ser colocados em qualquer lugar no domínio físico, sem restrição. Portanto, estes podem ser colocadas para se encaixar com qualquer forma de domínio sem reduzir consideravelmente o tamanho do elemento no MEAV. Os tamanhos dos elementos podem ser variados e concentram-se em áreas de interesse através da variação da densidade de nós do elemento.

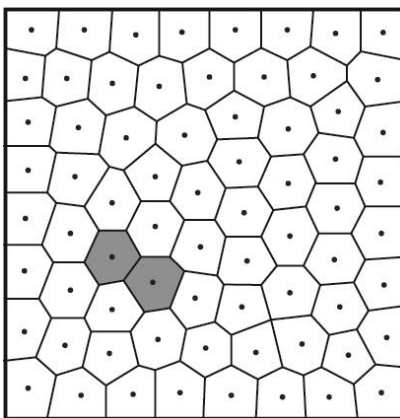


Figura 11 - Método dos Elementos Aplicados ao Voronoi  
Fonte: Worakanchana e Meguro (2008)

Para Gibson et al. (2010) as partes mostradas na figura 12 ilustram um método de desenvolvimento de estruturas leves, rígidas, com uma parede fina que adquire resistência através do uso de treliças.



Figura 12 - Parte de um cilindro com duas camadas de treliças fabricadas em SL  
Fonte: Gibson et al (2010)

Defeitos, introduzidos através da remoção de paredes celulares em locais aleatórios, causam uma diminuição acentuada das propriedades mecânicas do Voronoi. No entanto, os resultados indicaram que as propriedades elásticas das Estruturas de Voronoi são mais sensíveis às paredes que estão ausentes quando comparados com os de favos sextavados regulares. Tanto o mosaico de Voronoi quanto os favos regulares exibiram a mesma resistência à deformação e sensibilidade à remoção da parede celular (SILVA E GIBSON, 1997).

A modelagem pode ser realizada de diversas maneiras, utilizando tanto uma aproximação discreta de distância geodésica, quanto técnicas de parametrização para um domínio 2D (ALLIEZ et al., 2005). Algumas técnicas são baseadas na projeção do domínio para um espaço 6D em que a métrica se torna euclidiana (LÉVY E BONNEEL, 2012). Panozzo et al. (2014), mostram que uma simples deformação da superfície em 3D é suficiente para obter uma aproximação métrica euclidiana, desde que as mudanças de escala e anisotropia, induzidas pela métrica original, não sejam demasiadamente elevadas.

Métodos de otimização, tanto de tamanho quanto de topologia têm sido demonstrados através de projetos de estrutura celular. (GIBSON et al., 2010). Em se tratando do uso de CAD como ferramenta de projeto para a manufatura aditiva, Wohlers (2009) relata que já

existem softwares que permitem ao projetista trabalhar com formas livres de geração de estruturas celulares. Dentre estes se encontra o Rhinoceros®, o qual pode ser aperfeiçoado por plug-ins, tais como: o Grasshoper® e o Rabbit®.

O suporte da dobradiça do Airbus A320 (Figura 13) projetado pela EADS Innovations Works em parceria com a EOS-Innovations é um exemplo da utilização de estruturas celulares no projeto mecânico. A peça anteriormente feita em aço por fundição foi reprojetada para manufatura aditiva e construída em titânio por fusão seletiva a laser (SLM – *Selective Laser Melting*), obteve redução do peso devido à liberdade de projeto, e também redução do consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

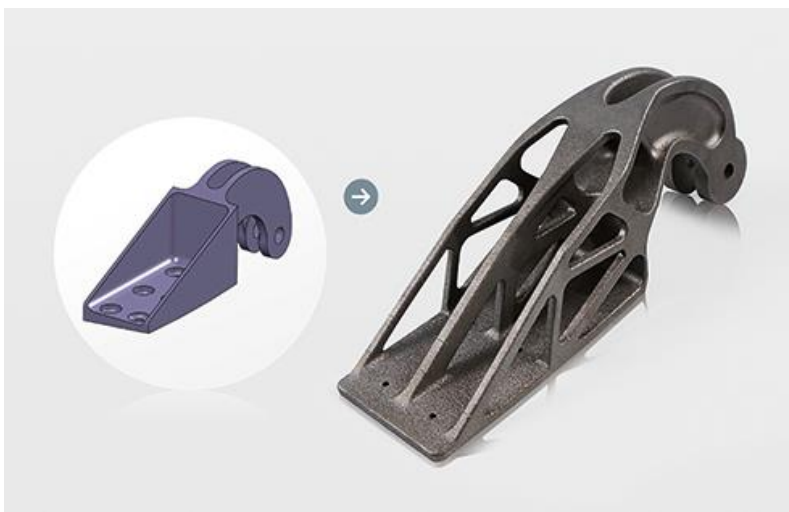


Figura 13 - Suporte de dobradiça para o Airbus A320

Fonte: [http://www.eos.info/press/customer\\_case\\_studies/eads](http://www.eos.info/press/customer_case_studies/eads)

Um exemplo da aplicação de estruturas celulares irregulares, no projeto para manufatura aditiva, foi o apresentado pela empresa alemã EDAG, como conceito para o futuro da indústria automobilística no salão do automóvel de Genebra de 2014. Neste, a carenagem se assemelha a um componente em forma de sanduíche, com estrutura interna fina que oferece resistência e reforço, baseando-se mimeticamente ao casco de uma tartaruga, que oferece proteção e amortecimento enquanto unido ao esqueleto da mesma (Figura 14). O objetivo dos criadores do conceito foi mostrar a liberdade que os

processos de manufatura aditiva podem trazer ao projeto de produtos, permitindo a criação de componentes resistentes à carga, biônicos e multifuncionais com espessuras sem sobredimensionamento e características materiais de excelente qualidade.

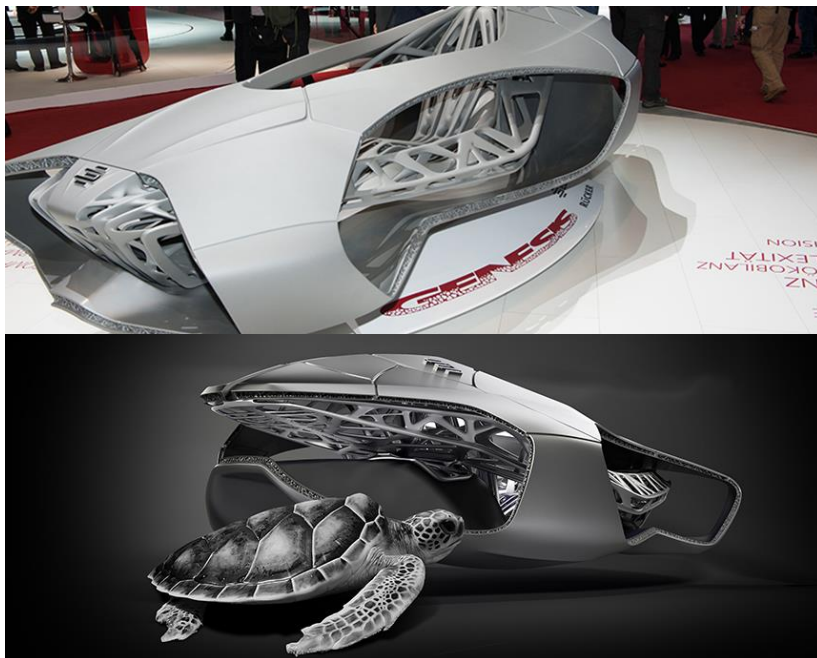


Figura 14 - EDAG Genesis

Fonte: <http://www.edag.com.br/br/edag-do-brasil/historias-edag/manufatura-aditiva.html>

### 2.5.1 Propriedades mecânicas das peças com estruturas celulares

Apesar da crescente importância que vem sendo dada ao projeto para manufatura aditiva, e em especial às técnicas e alternativas de modelagem utilizando estruturas celulares, poucos trabalhos fazem referência a estudos que avaliem a influência deste tipo de modelagem nas propriedades mecânicas das peças fabricadas por equipamentos de MA.

Por exemplo, Jen e Chang (2008) avaliaram a resistência à fadiga por flexão a quatro pontos de vigas com estruturas celulares sextavadas regulares com diferentes densidades, fabricadas em alumínio por fusão seletiva a laser (SLM). Os resultados mostraram que a resistência à

fadiga por flexão aumenta de acordo com a densidade relativa das estruturas.

Por sua vez, Ajdari, Babaei, e Vaziri (2011), investigaram o comportamento e a energia de absorção, por compressão, de estruturas celulares regulares e irregulares, fabricadas de material plástico por sinterização seletiva a laser (SLS). O estudo apresentou que as estruturas irregulares exibiram absorção de energia semelhante ao seu homólogo regular de mesma densidade, mostrando que a introdução de gradientes de densidade altera significativamente o modo de deformação e absorção de energia das estruturas celulares.

Já Li et al. (2014), pesquisaram os efeitos da velocidade de impacto, o grau de irregularidade da célula, e a densidade relativa, simulando em software CAE três distintas estruturas celulares. Os resultados mostraram que o estresse de superfície diminuiu com o aumento do grau de irregularidade da célula de Voronoi, porém este aumenta quando a densidade relativa torna-se maior.

Panda (2015) pesquisou as propriedades mecânicas de estruturas celulares hexagonais, fabricadas por modelagem por fusão e deposição (FDM), com diferentes tamanhos de célula e espessuras de parede, avaliando os efeitos destas sobre as propriedades de densidade e compressão. Os resultados evidenciaram que a resistência à compressão da estrutura celular hexagonal aumenta com o aumento do tamanho da célula e da espessura da parede, e a combinação destes dois parâmetros afeta a densidade relativa da peça. Foi também observado que a variação no volume do corpo de prova não altera os resultados em relação às propriedades de compressão, independentemente do tamanho da célula e a espessura da parede.

A literatura assim evidencia que as propriedades mecânicas das estruturas celulares estão relacionadas com a geometria e espessura de parede da célula, tornando assim essencial o estudo em relação a estes parâmetros para compreender o desempenho das estruturas celulares para uma aplicação industrial bem sucedida.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

O material utilizado neste trabalho foi a poliamida (PA) *DuraForm C01* –da 3D Systems® (Tabela 1), a qual apresenta elevada resistência quando exposta a ambientes agressivos, qualidade de acabamento de superfície com indicação para fabricação de peças complexas.

Tabela 1 - Propriedades da poliamida (PA) *DuraForm C01*  
Fonte: 3D Systems

Propriedades Gerais		
Medição	Norma	Valor
Peso Específico	ASTM D792	1.00 g/cm3
Absorção de umidade (24 horas)	ASTM D570	0.07%
Propriedades Mecânicas		
Medição	Norma	Valor
Resistência à Tração, Yield	ASTM D638	N/A*
Resistência à Tração, Ultimate	ASTM D638	43 MPa
Módulo de Elasticidade	ASTM D638	1586 MPa
Alongamento à Yield	ASTM D638	N/A*
Resistência à Flexão, Yield	ASTM D790	N/A*



## 3.2 MÉTODOS

Para avaliar e comparar as propriedades mecânicas das estruturas celulares e analisar o comportamento das mesmas quanto às variações na massa final dos corpos de prova e também ao número de células por  $\text{mm}^2$ , foi determinada uma sequência experimental (Figura 15). O projeto dos corpos de prova foi realizado em um software CAD de modelagem parametrizada e posteriormente realizada a fabricação por sinterização seletiva a laser. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaio de flexão e de impacto. Posteriormente foi realizada a caracterização das amostras em microscopia eletrônica de varredura.

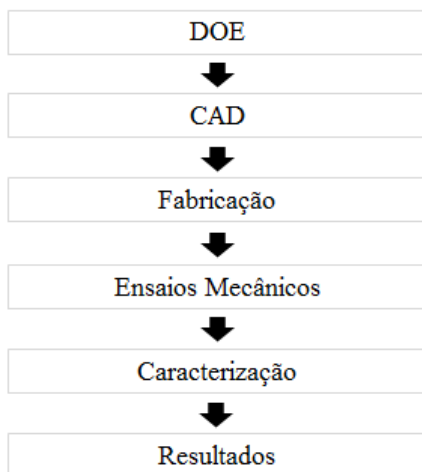


Figura 15 - Fluxograma da sequência experimental.

Fonte: Autora

### 3.2.1 Delineamento dos Experimentos (DOE)

Para a realização dos experimentos, foi proposto um projeto fatorial completo, contendo 2 fatores com 3 níveis, totalizando 9 condições para cada um dos experimentos, conforme as tabelas 2 e 3 para o ensaio de flexão a três pontos e Tabelas 7 e 8 para o ensaio de impacto Charpy. Os dados foram tratados estatisticamente no *software StatGraphics Centurion XV*. Como variáveis de resposta, foram

utilizados os valores resultantes dos ensaios de flexão e impacto Charpy. As análises estatísticas foram realizadas através da Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 0,05.

Tabela 2 - Condições e códigos do delineamento para o ensaio de flexão a três pontos e impacto Charpy

Fonte: Autora

Condição	Código	
	Flexão a três pontos	Impacto Charpy
1	70A	70A'
2	50B	50B'
3	50A	50A'
4	50C	50C'
6	70C	70C'
9	70B	70B'
10	P	P'

Tabela 3 - Delineamento experimental para o ensaio de flexão a três pontos e impacto Charpy

Fonte: Autora

	Fator	Nível	Código
Flexão a três pontos	Volume	50%	50
		70%	70
	Células por mm <sup>2</sup> (c/mm <sup>2</sup> )	0,0066 (c/mm <sup>2</sup> )	A
		0,0132 (c/mm <sup>2</sup> )	B
		0,0200 (c/mm <sup>2</sup> )	C
	Comparativo	-	P
Impacto Charpy	Volume	50%	50
		70%	70
	Células por mm <sup>2</sup> (c/mm <sup>2</sup> )	0,033 (c/mm <sup>2</sup> )	A'
		0,066 (c/mm <sup>2</sup> )	B'
		0,100 (c/mm <sup>2</sup> )	C'
	Comparativo	-	P'

Além dos resultados obtidos pelo DOE, foram realizadas microscopias para verificação do local e aspectos da fratura ocorrida no ensaio de impacto Charpy.

### 3.2.2 Modelagem dos corpos de prova

Para a modelagem dos corpos de prova foi utilizado o software CAD *Rhinoceros* 5<sup>®</sup> e seu plug-in de modelagem paramétrica *Grasshopper*<sup>®</sup>. O *Rhinoceros* 5<sup>®</sup> é um *software* de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS<sup>1</sup>, e o *Grasshopper*<sup>®</sup> é uma linguagem de programação visual, utilizada principalmente para construir algoritmos generativos.

O código de modelagem dos corpos de prova desta dissertação pode ser dividido em nove partes, como mostra a figura 16.

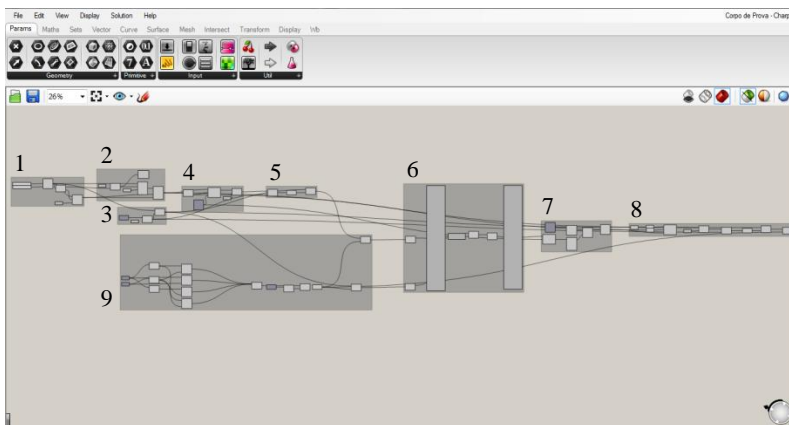


Figura 16 - Código de modelagem dos corpos de prova

Fonte: Autora

Na parte de número 1, o código delimita a área da superfície dos corpos de prova de acordo com suas respectivas normas, neste também é realizado um delineamento de uma espessura de borda de segurança, como ilustra a figura 17.

---

<sup>1</sup> *Non Uniform Rational Basis Spline* (NURBS), um modelo matemático



também foi definido um filete para eliminação dos cantos vivos (Figura 20).

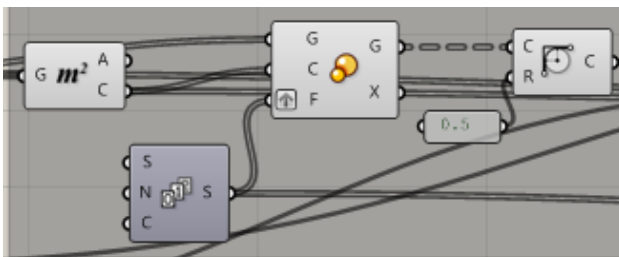


Figura 20 - Parte 4 do código de modelagem dos corpos de prova  
Fonte: Autora

De acordo com a figura 21, na parte 5 ocorre extrusão das células do diagrama geradas na segunda etapa, posteriormente foi realizada a subtração dos volumes criados na terceira etapa com as células extrudadas.



Figura 21 - Parte 5 do código de modelagem dos corpos de prova  
Fonte: Autora

Na parte 6 (Figura 22), há a análise dos volumes dos sólidos em cada valor de escala gerado na quarta etapa, e também a análise da porcentagem deste volume em relação ao corpo de prova maciço.



Figura 22 - Parte 6 do código de modelagem dos corpos de prova  
Fonte: Autora

Na parte 7 o código realiza a interpolação linear com os valores de porcentagem obtidos na sexta etapa com os valores de escala gerados na quarta etapa, com o intuito de obter os valores de escalas que correspondem a 30%, 50% e 70% do valor do volume do sólido maciço, como mostra a figura 23.

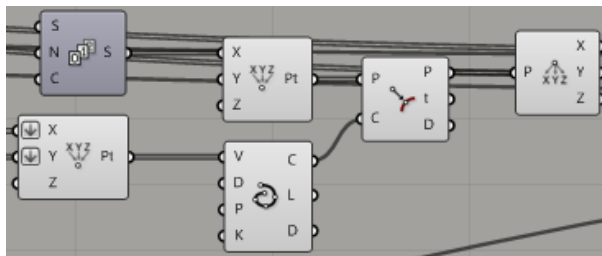


Figura 23 - Parte 7 do código de modelagem dos corpos de prova  
Fonte: Autora

Na parte 8 de acordo com a figura 24, ocorre a recriação dos sólidos com os valores de escala obtidos na sétima etapa para a construção dos três corpos de prova.



Figura 24 - Parte 8 do código de modelagem dos corpos de prova

Fonte: Autora

A parte 9 é apenas utilizada nos corpos de prova para o de impacto Charpy, havendo a construção de uma figura auxiliar (prisma de base triangular), de acordo com a norma ASTM D6110-10, para realização do entalhe no corpo de prova, Charpy tipo A, através de uma subtração de sólidos (Figura 25).

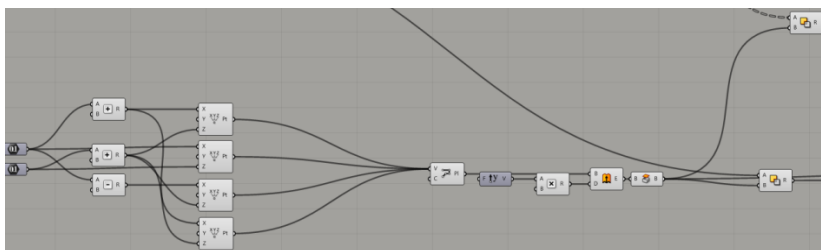


Figura 25 - Parte 9 do código de modelagem dos corpos de prova

Fonte: Autora

Os apêndices A e B mostram o detalhamento dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy e flexão a três pontos, resultante do código detalhado anteriormente.

### 3.2.3 Impressão dos corpos de prova

A impressão dos corpos de prova foi realizada no CTI - Renato Archer em Campinas/SP, utilizando a tecnologia de sinterização seletiva a laser do equipamento SLS Sinterstation 2000. O material utilizado na fabricação dos corpos de prova foi a poliamida 12 reutilizada, com tamanho médio de partículas variando de 25 a 90  $\mu\text{m}$ . Os valores dos parâmetros de fabricação utilizados foram os valores *default* empregados pelo fabricante e que se encontram na Tabela 4, sendo a

potência do laser de 6W, espessura de camada de 100 microns e temperatura do leito de pó em torno de 183 °C. Os CPs gerados foram produzidos com a estratégia de varredura do laser em X e Y, intercalado entre as camadas, ou seja, ora uma camada era processada com a varredura em X ora em Y, com o espaçamento da varredura de 0,15mm, considerando o diâmetro do feixe do laser em torno de 0,5 mm.

Tabela 4 - Parâmetros de fabricação utilizados na confecção dos corpos de prova

Fonte: CTI Renato Archer

Fonte: CPT Renato Archer

<b>Modelo de equipamento:</b> SLS SinterStation 2000			
<b>Material:</b> Poliamida <i>Duraform</i> - C01 – Reutilizado			
<b>Escala</b>	X: 1,0449	Y: 1,0478	Z: 1,014
<b>Deslocamento</b>	X: 0,182364	Y: 0,197429	
<b>Temperatura do leito de pó(°C):</b> 183			
<b>Temperatura nominal - esquerdo (°C):</b> 100			
<b>Temperatura nominal - direito (°C):</b> 100			
<b>Potência do laser (W):</b> 6,0			
<b>Potência do delineamento (W):</b> N/A			
<b>Espessura da camada (mm):</b> 0,10			
<b>Altura total da peça (mm):</b> 272,947			

### 3.2.4 Ensaios e caracterização

#### 3.2.4.1 Ensaio mecânico de flexão a três pontos

Os corpos de prova foram dimensionados de acordo com a norma ASTM D790-02, e os ensaios foram realizados no equipamento de ensaios universais (EMIC linha DL), com célula de carga de 20N (CCE20N NO12157) e velocidade de 0,5 mm/s, em temperatura ambiente (23°C) e com umidade relativa do ar de 65%.



### 3.2.4.2 Ensaio mecânico de Impacto Charpy

Foi realizado o ensaio de impacto para a avaliação dos corpos de prova segundo sua tendência de se comportar de uma maneira frágil. Os corpos de prova utilizados foram os de formato Charpy tipo A, com dimensões de acordo com a norma ASTM D6110-10. O ensaio foi realizado em um equipamento *Wolfgang Ohst Rathenow* (Frab-Nr 047 – Ano1979) com martelo de 9J utilizado para materiais poliméricos, em temperatura ambiente (23°C) e humidade relativa do ar de 65%, de acordo com a norma.

### 3.2.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para avaliação detalhada do comportamento mecânico no processo de fratura do corpo de prova ensaiado em impacto Charpy, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura. Para a realização da MEV as amostras foram fixadas com fita de carbono e recobertas com uma camada de ouro por um metalizador *Sputtering*. O equipamento utilizado para este estudo foi o microscópio VEGA3 TESCAN localizado no Laboratório de Catálise e Produção de Biocombustíveis - LabCatProBio da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIO DE FLEXÃO A TRÊS PONTOS

A Figura 26 mostra as diferentes geometrias dos corpos de prova utilizados para os ensaios de flexão a três pontos, enquanto a Tabela 5 apresenta os resultados calculados das médias das forças necessárias para a deformação do corpo de prova durante o ensaio, com os respectivos desvios-padrão, e valores mínimos e máximos atingidos.

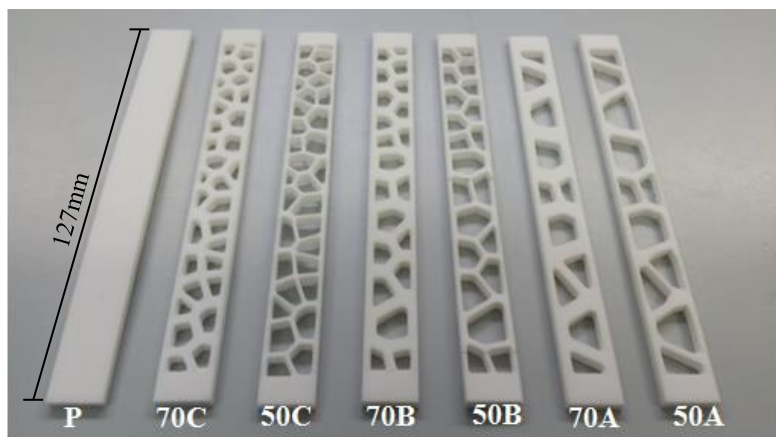


Figura 26 - Corpos de prova para ensaio de flexão a três pontos  
Fonte: Autora

Tabela 5 - Valores do ensaio de flexão a três pontos referentes às tensões (MPa) necessárias para a deformação

Fonte: Autora

		Tensão máxima (MPa x 10 <sup>-2</sup> )	Módulo de Ruptura (MPa)
P	<b>Média</b>	0,78	16,52
	<b>Desvio padrão</b>	0,09	01,91
	<b>Mínimo</b>	0,71	15,17
	<b>Máximo</b>	0,84	17,88
70C	<b>Média</b>	0,68	14,58
	<b>Desvio padrão</b>	0,09	02,00
	<b>Mínimo</b>	0,57	12,27
	<b>Máximo</b>	0,74	15,85
50C	<b>Média</b>	0,47	09,97
	<b>Desvio padrão</b>	0,06	01,29
	<b>Mínimo</b>	0,41	08,75
	<b>Máximo</b>	0,53	11,33
70B	<b>Média</b>	0,57	12,18
	<b>Desvio padrão</b>	0,11	02,41
	<b>Mínimo</b>	0,45	09,59
	<b>Máximo</b>	0,67	14,38
50B	<b>Média</b>	0,48	10,30
	<b>Desvio padrão</b>	0,05	01,14
	<b>Mínimo</b>	0,42	09,03
	<b>Máximo</b>	0,53	11,26
70A	<b>Média</b>	0,53	11,36
	<b>Desvio padrão</b>	0,06	01,28
	<b>Mínimo</b>	0,46	09,91
	<b>Máximo</b>	0,58	12,31
50A	<b>Média</b>	0,47	10,15
	<b>Desvio padrão</b>	0,04	01,02
	<b>Mínimo</b>	0,42	09,01
	<b>Máximo</b>	0,52	11,01

Assumindo que a distribuição gaussiana é representativa, em um processo de medição de variáveis, a Tabela 6 mostra as médias com o intervalo de confiança com nível de significância de 0,05.

Tabela 6 - Análise de variância com intervalo de confiança com nível de significância de 0,05

Fonte: Autora

		Média (MPa $\times 10^{-6}$ )	ANOVA (MPa $\times 10^{-6}$ )
Padrão		7800	+ - 0,529
0,0200	70%	6800	+ - 0,529
	50%	4700	+ - 0,235
0,0132	70%	5700	+ - 0,790
	50%	4800	+ - 0,163
0,0066	70%	5300	+ - 0,235
	50%	4700	+ - 0,104

O gráfico ilustrado na figura 27 apresenta os resultados comparativos entre todas as amostras ensaiadas. Neste é possível notar que os CPs com 70% do volume apresentaram resistência mais elevada que as amostras com 50% do volume, também com a mesma configuração celular, os quais apresentaram resistência à força máxima similar independente do número de células presentes.

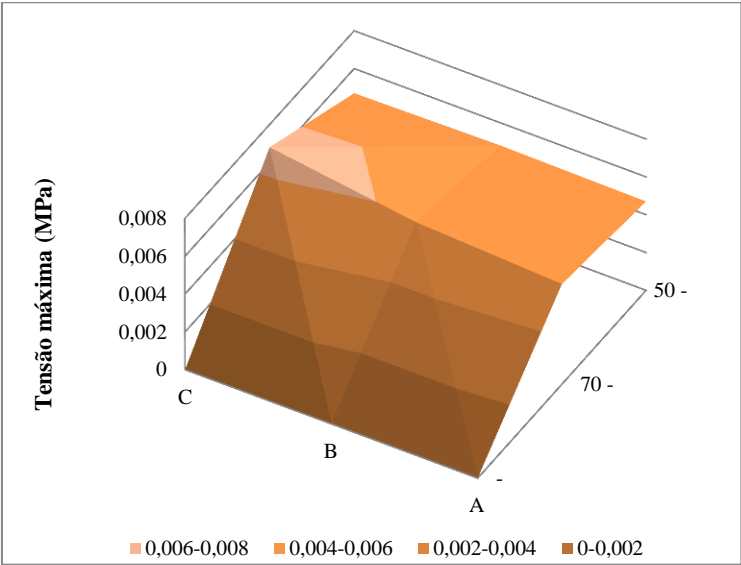


Figura 27 - Gráfico de superfície comparativo entre todos os valores da tabela

Fonte: Autora

Na análise dos gráficos (Figuras 28, 29 e 30), é possível perceber que, em relação aos CPs com 0,0200 células por mm<sup>2</sup>, as amostras com 70% do volume total sofreram uma redução de aproximadamente 12% na força máxima suportada, em relação aos CPs padrão, enquanto os com 50% do volume reduziram em cerca 39% a sua resistência também em relação aos CPs padrão. Quanto às amostras com 0,0132 células por mm<sup>2</sup>, os com 70% do volume foram em média 26% menos resistentes que os CPs padrão, enquanto aqueles com 50% do volume sofreram uma redução aproximada de 38%. Já nas amostras com 0,0066 células por mm<sup>2</sup> que apresentam 70% do volume foram em cerca 32% menos resistentes que os CPs, enquanto as com 50% do volume sofreram uma redução de 39% à força máxima.

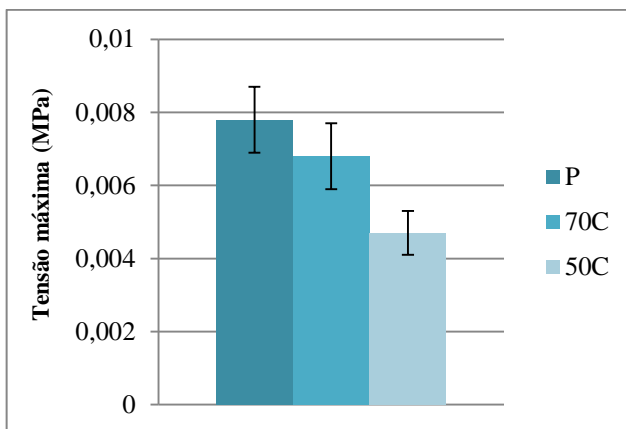


Figura 28 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0200 células por mm<sup>2</sup>, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

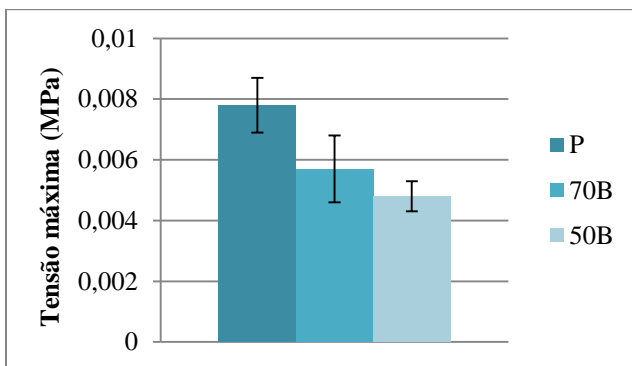


Figura 29 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0132 células por  $\text{mm}^2$ , com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

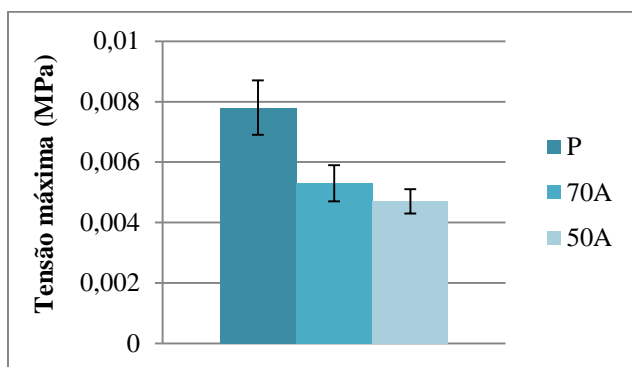


Figura 30 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,0066 células por  $\text{mm}^2$ , com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

Nos gráficos representados pelas figuras 31 e 32 é possível observar que, em relação aos CPs com 70% do volume, as amostras com 0,0200 células por  $\text{mm}^2$  sofreram uma redução aproximada de 12%, e as com 0,0132 células por  $\text{mm}^2$  reduziram em cerca 26% a resistência à carga máxima aplicada, as amostras com 0,0066 foram aproximadamente 32% menos resistente que o corpo de prova padrão. Já quanto aos CPs com 50% do volume, as amostras com 0,0200 células por  $\text{mm}^2$  sofreram uma redução de aproximadamente 39% em relação aos CPs padrão, os com 0,0132 células por  $\text{mm}^2$  reduziram em cerca 38% e aqueles com 0,0066 células por  $\text{mm}^2$  reduziram

aproximadamente 39% a resistência à força máxima suportada pela amostra.

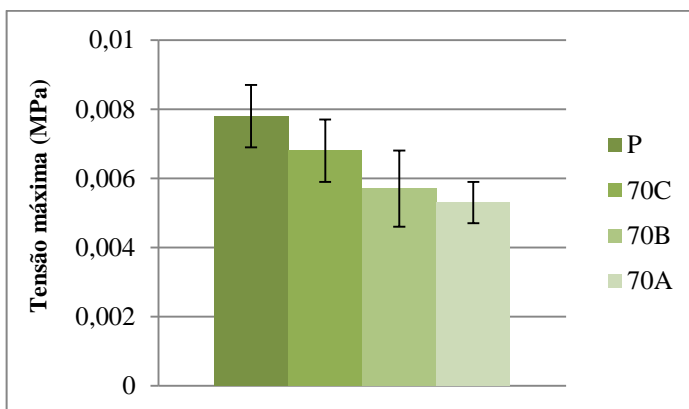


Figura 31 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 70% do volume, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

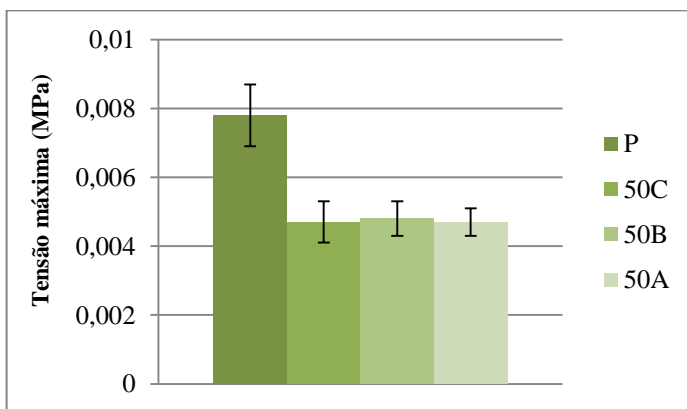


Figura 32 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 50% do volume, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

4.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

As geometrias dos corpos de prova utilizados para os ensaios de impacto Charpy podem ser vistas na figura 33, enquanto a Tabela 7 apresenta os resultados calculados das médias da energia absorvida pelo corpo de prova durante o ensaio, com os respectivos desvios-padrão, e valores mínimos e máximos atingidos.

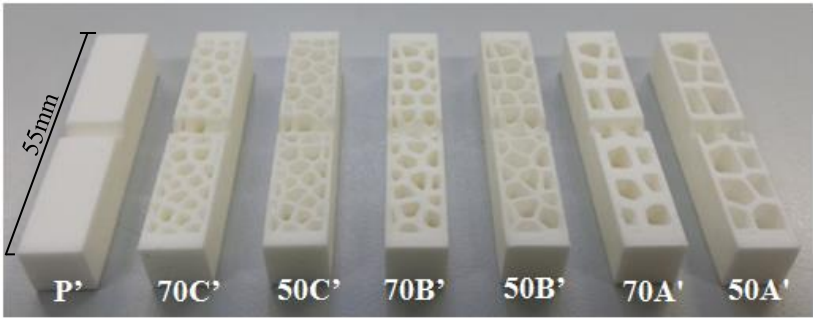


Figura 33 - Corpos de prova  
Fonte: Autora

Tabela 7 - Valores do ensaio de Impacto Charpy referentes à energia absorvida ( $J \times 10^{-2}$ ).

Fonte: Autora

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
<b>P'</b>	7,84	1,29	6,86	9,31
<b>70C'</b>	7,19	1,23	5,88	8,33
<b>50C'</b>	5,31	1,47	3,92	6,86
<b>70B'</b>	8,49	0,51	8,09	9,07
<b>50B'</b>	5,88	1,06	5,14	7,10
<b>70A'</b>	5,55	1,20	4,16	6,37
<b>50A'</b>	3,75	0,37	3,43	4,16

Assumindo que a distribuição gaussiana é representativa, em um processo de medição de variáveis a Tabela 8 mostra as médias com intervalo de confiança com nível de significância de 0,05.



Tabela 8 - Análise de variância com intervalo de confiança com nível de significância de 0,05

Fonte: Autora

		<b>Média</b> <b>(MPa <math>\times 10^{-4}</math>)</b>	<b>ANOVA</b> <b>(MPa <math>\times 10^{-4}</math>)</b>
<b>Padrão</b>		784,53	+ - 1,09
<b>0,100</b>	<b>70%</b>	719,15	+ - 0,99
	<b>50%</b>	531,19	+ - 1,42
<b>0,066</b>	<b>70%</b>	849,91	+ - 0,17
	<b>50%</b>	588,39	+ - 0,74
<b>0,033</b>	<b>70%</b>	555,71	+ - 0,95
	<b>50%</b>	375,92	+ - 0,09

O gráfico de superfície ilustrado na figura 34 apresenta os resultados comparativos entre todas as amostras ensaiadas. Neste é possível visualizar que os CPs com 0,100 células por mm<sup>2</sup> e 0,066 células por mm<sup>2</sup> com volume de 70% apresentaram uma pequena variação em relação aos CPs padrão, por sua vez as amostras com 50% do volume apresentaram uma perda significativa na sua resistência. Já os CPs com 0,033 de células por mm<sup>2</sup> tanto para 70% quanto 50% do volume apresentaram uma baixa resistência ao impacto.

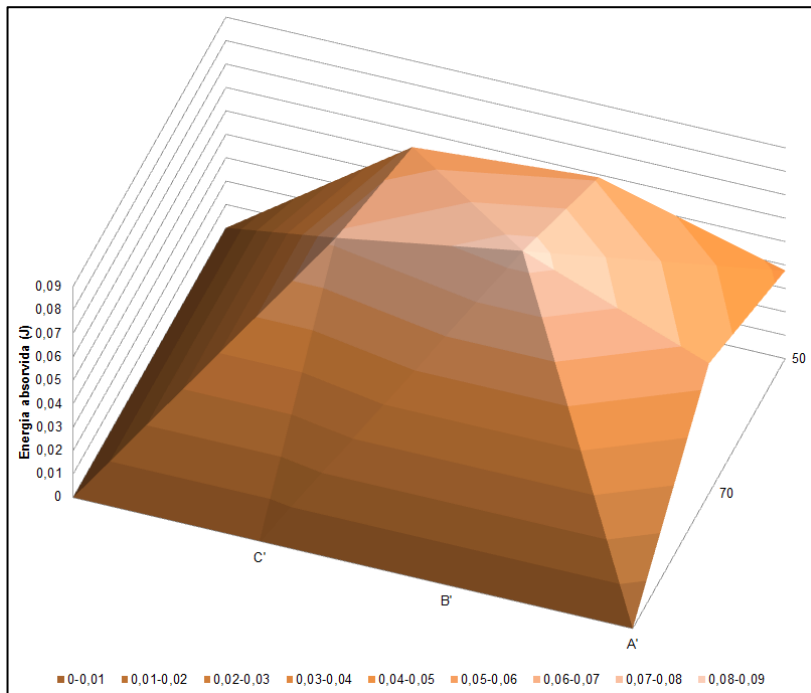


Figura 34 - Gráfico de superfície comparativo entre todos os valores da tabela  
Fonte: Autora

Nos diagramas representados pelas figuras 35 e 36, os quais apresentam comparativamente os resultados de acordo com a porcentagem de volume, com seus respectivos intervalos de confiança, é possível observar que, em relação CPs com 70% do volume as amostras com 0,100 e com 0,066 células por  $\text{mm}^2$  não sofreram alterações significativas em relação à energia ao impacto absorvida se comparado ao CPs padrão, enquanto as amostras com 0,033 sofreram uma redução aproximada 29% a resistência ao impacto.

Já quanto aos CPs com 50% do volume, as amostras com 0,100 células por  $\text{mm}^2$  e com 0,066 células por  $\text{mm}^2$  não apresentaram expressivas diferenças quanto à energia absorvida se comparadas apenas entre si, porém estas sofreram de modo geral uma redução de 28% em relação aos CPs padrão, e aqueles com 0,033 células por  $\text{mm}^2$  reduziram aproximadamente 52% a resistência ao impacto.

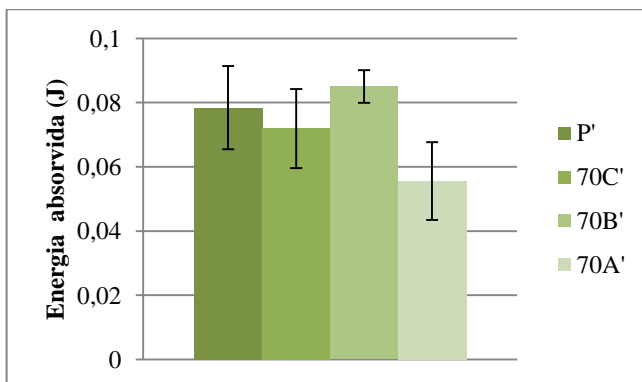


Figura 35 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 70% do volume, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

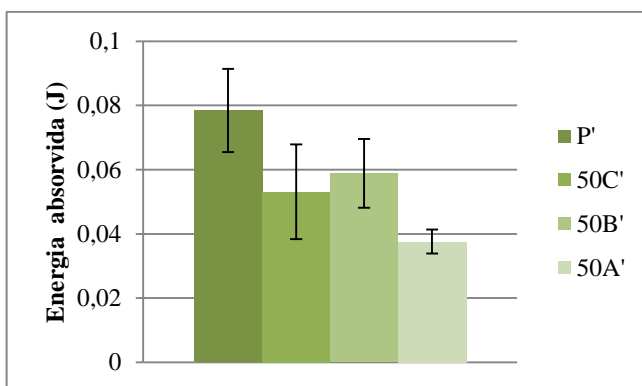


Figura 36 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 50% do volume, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

Analisando os diagramas comparativos entre a quantidade de células presentes nas amostras com os CPs padrão e seus respectivos intervalos de confiança, (Figuras 37, 38 e 39), é possível perceber que, em relação aos CPs com 0,100 células por  $\text{mm}^2$ , as amostras com 70% do volume total sofreram uma redução de aproximadamente 8% na resistência ao impacto em relação aos CPs padrão, enquanto os com 50% do volume reduziram em cerca 32% a sua resistência. Quanto aos corpos de prova com 0,066 células por  $\text{mm}^2$ , os com 70% do volume foram em média 8% mais resistentes que os CPs padrão, enquanto

aqueles com 50% do volume sofreram uma redução aproximada de 25%. Já nas amostras com 0,033 células por  $\text{mm}^2$  que apresentam 70% do volume foram em cerca 29% menos resistentes que os corpos de prova padrão, enquanto as com 50% do volume sofreram uma redução de 52% da resistência ao impacto.

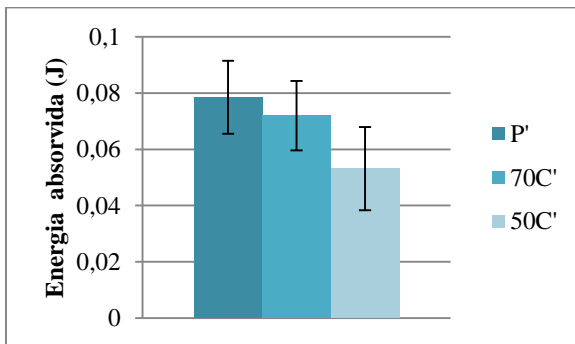


Figura 37 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,100 células por  $\text{mm}^2$ , com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

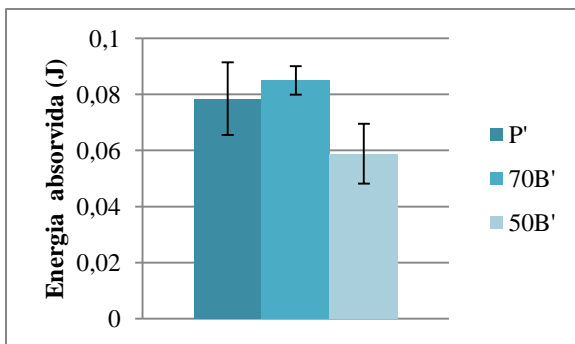


Figura 38 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,066 células por  $\text{mm}^2$ , com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

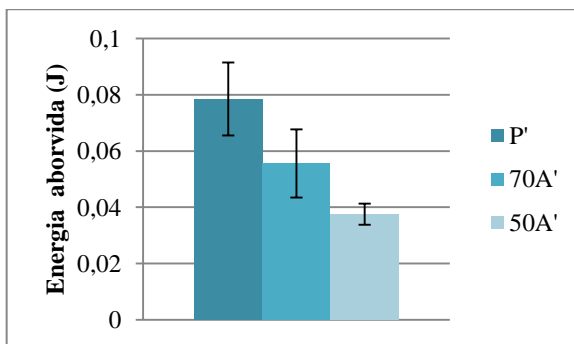


Figura 39 - Gráfico comparativo entre o corpo de prova padrão e os corpos de prova com 0,033 células por mm<sup>2</sup>, com os respectivos desvios padrão

Fonte: Autora

#### 4.3 RESULTADOS DA MICROSCOPIA

As micrografias permitem observar a região de fratura na superfície e avaliar como ocorreu a propagação de trincas das amostras fraturadas no ensaio de impacto por Charpy (Figura 40). A verificação das características morfológicas de regiões da superfície e fratura das amostras possibilitou a comparação entre as amostras fabricadas com os mesmos parâmetros de processamento, porém com diferencial de células presentes na estrutura e variação do volume total em relação a um corpo de prova padrão.

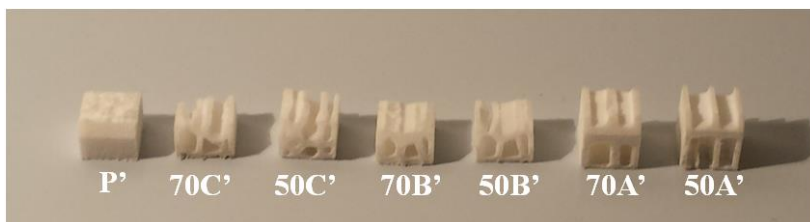


Figura 40 – Superfície fraturada por impacto Charpy

Fonte: Autora

As figuras 41 a 47 mostram micrografias com ampliações de 100 e 1000 vezes, estas sugerem que apesar das amostras terem sido fabricadas com os mesmos parâmetros de fabricação e material (PA12), a presença de estruturas celulares irregulares afetarem a microestrutura

das amostras. Esta alteração na microestrutura dos corpos de prova verifica-se devido à dissipação do calor ser menor nos corpos de prova com estruturas celulares, gerando áreas com maior concentração de calor, fundindo assim o material. Para a sinterização ocorrer igualmente entre os CPs, estes teriam que ser construídos com diferentes parâmetros de acordo com a espessura da parede entre as células da estrutura. O corpo de prova padrão (Figura 41) indica uma diferença no grau de sinterização (união das partículas de pó) em relação às demais amostras, apresentando uma grande quantidade de aglomerados poliméricos fracamente ligados, com regiões de fratura pouco aparentes. A quantidade destes aglomerados foi menor nos CPs fabricados com estruturas celulares (Figuras 41 a 47). Nestes também é observável ocorrência da propagação do impacto sofrido pelas amostras, evidenciando os resultados de absorção da energia do ensaio de impacto Charpy.

Comparando a micrografia das amostras, as que apresentam 50% do volume em relação ao corpo de prova padrão (Figuras 43, 45 e 47) exibiram uma superfície com características de maior fragilidade.

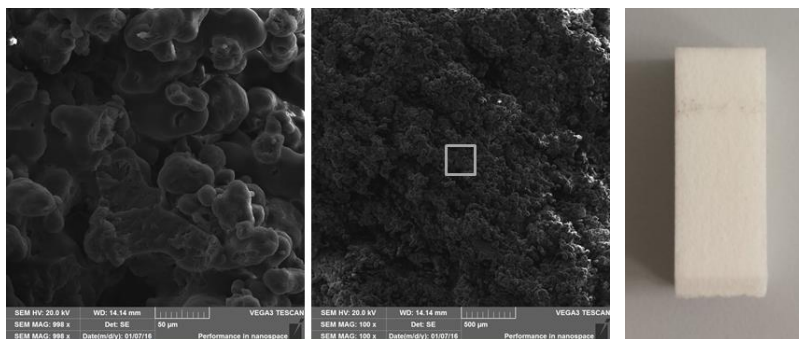


Figura 41 - MEV do corpo de prova padrão – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)

Fonte: Autora

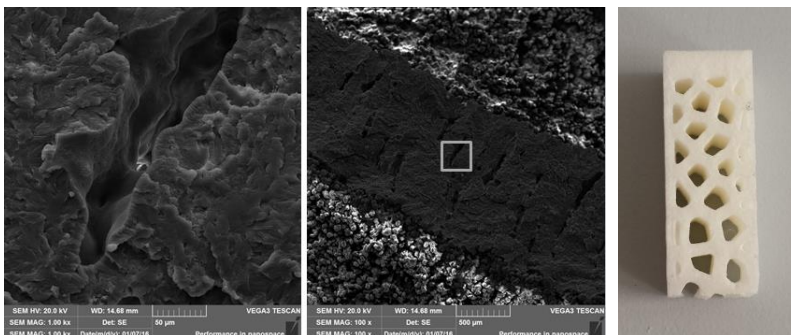


Figura 42 - MEV do corpo de prova de 0,1 células/mm<sup>2</sup> com 70% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)

Fonte: Autora

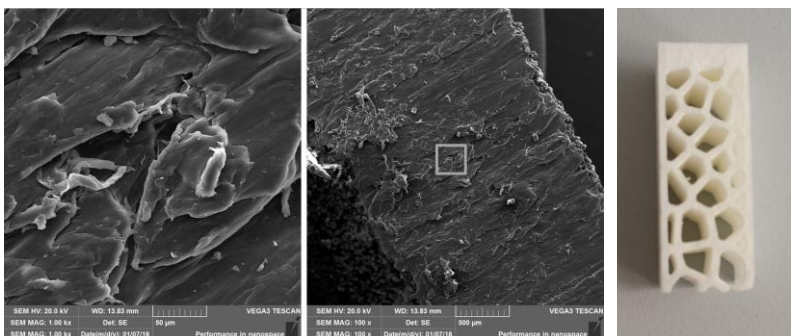


Figura 43 - MEV do corpo de prova de 0,1 células/mm<sup>2</sup> com 50% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)

Fonte: Autora

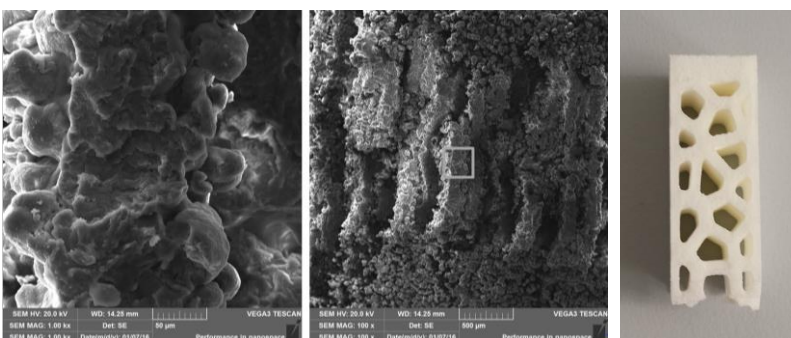


Figura 44 - MEV do corpo de prova de 0,066 células/mm<sup>2</sup> com 70% do volume – comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)

Fonte: Autora

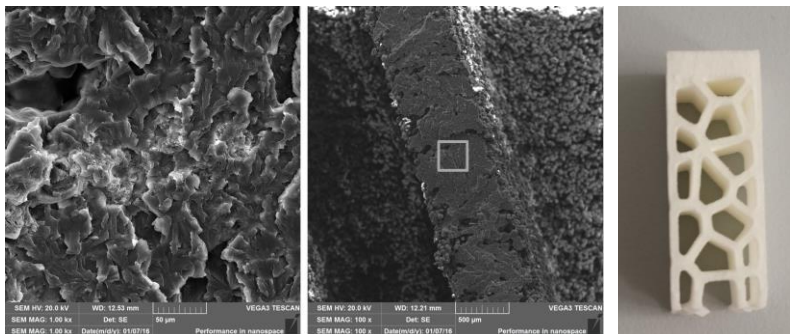


Figura 45 - MEV do corpo de prova de 0,066 células/mm<sup>2</sup> com 50% do volume  
– comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)  
Fonte: Autora

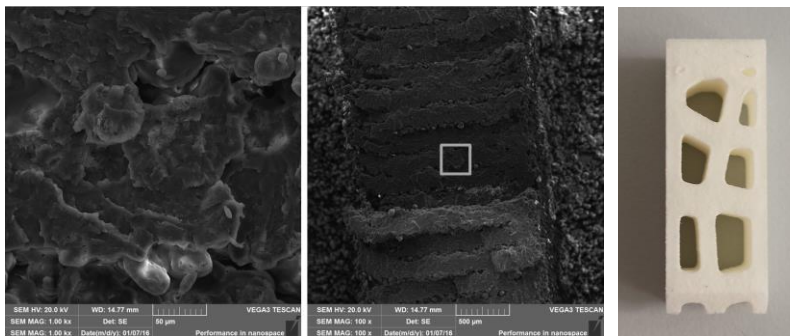


Figura 46 - MEV do corpo de prova de 0,033 células/mm<sup>2</sup> com 70% do volume  
– comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)  
Fonte: Autora

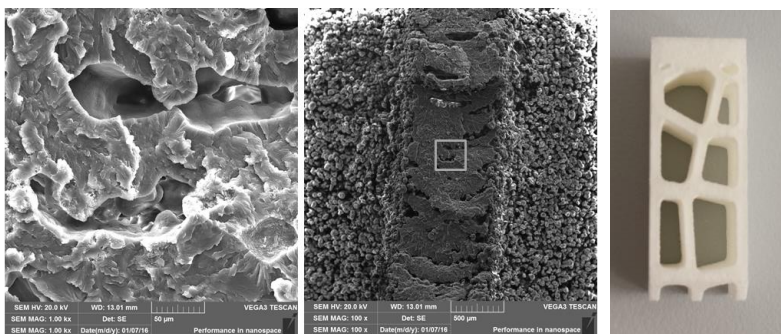


Figura 47 - MEV do corpo de prova de 0,033 células/mm<sup>2</sup> com 50% do volume  
– comparação entre ampliação de 1000x (esquerda) e 100x (direita)  
Fonte: Autora



## 5. CONCLUSÃO

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o emprego das estruturas celulares irregulares, modeladas de modo parametrizado em software CAD, por meio de dois distintos ensaios mecânicos, para a aplicação no projeto para manufatura aditiva.

A modelagem dos corpos de prova no software *Rhinoceros* com o *plug-in Grasshopper* proporcionou de forma simplificada a construção de estruturas complexas, seguindo os princípios do projeto para manufatura aditiva. Permitindo que todas as etapas da modelagem ocorressem utilizando apenas um *software*, incluindo os cálculos da dispersão das células de Voronoi e das massas dos corpos de prova por meio da interpolação dos dados.

A utilização da sinterização seletiva a laser para a fabricação das amostras permitiu que estas fossem fabricadas com precisão. Porém, mesmo assim, a fabricação dos corpos de prova com 30% do volume em comparação ao corpo de prova padrão não foi possível devido à resolução permitida pelo laser disponível para a realização deste trabalho. Também a utilização de poliamida 12 reutilizada pode ter interferido nos valores alcançados nos ensaios. Contudo como se tratam de resultados comparativos em relação a um corpo de prova padrão fabricado nas mesmas configurações, os resultados ainda se tornam válidos.

Em se tratando do ensaio de flexão em três pontos o corpo de prova padrão mostrou melhor desempenho que os demais, sendo aproximadamente 12% mais resistente que a estrutura celular mais resistente, a qual contém o maior número de células (0,0200 células por mm<sup>2</sup>) e maior volume (70% do volume total do corpo de prova padrão). O corpo de prova menos resistente apresentou uma redução de cerca de 39% em relação ao corpo de prova padrão. Este possui o menor número de células, tendo respectivamente o menor número de treliças (0,0066 células por mm<sup>2</sup>) e volume 50% menor que o corpo de prova padrão. De maneira geral, comparando apenas os resultados das amostras investigadas que contém estruturas celulares, é possível afirmar que a resistência da estrutura aumenta de acordo com o número de células presentes, enquanto por outro lado se torna indiferente a configuração

das células quando as amostras possuem apenas 50% do volume total em relação ao corpo de prova padrão estabelecido.

Já no ensaio de impacto Charpy os resultados se mostram diferentes, sendo que as amostras que mais absorveram energia antes da fratura são as com nível médio de estruturas celulares (0,066 células por  $\text{mm}^2$ ) e com 70% do volume em relação aos CPs padrão. Porém foi também possível notar que os corpos de prova com 70% do volume nas configurações de 0,1 e 0,066 células por  $\text{mm}^2$  (sendo estes os com mais células em sua estrutura) e os CPs padrão não apresentaram real diferença em seus resultados se adotado o desvio padrão com variância de 0,05. Assim como no ensaio de flexão, os resultados das amostras com 50% do volume apresentaram um resultado não satisfatório independente da configuração células das amostras, assim como as amostras com poucas células na estrutura.

As micrografias, além de validar os resultados obtidos no ensaio de impacto, sugerem que as estruturas celulares irregulares alteraram a microestrutura das amostras, apesar destas terem sido fabricadas sob os mesmos parâmetros, obtiveram resultados diferentes de acordo com a configuração celular de cada amostra. Esta alteração na microestrutura ocorreu devido à maior dissipação do calor no corpo de prova sólido e nas paredes celulares mais espessas, para a sinterização ocorrer igualmente nos corpos de prova com diferente configuração celular e espessura de parede, estes teriam que ser construídos com diferentes parâmetros de impressão.

Sendo assim, a utilização das estruturas celulares irregulares de Voronoi impressas em sinterização seletiva a laser permite um elevado nível de flexibilidade e eficiência no projeto de produto. A maleabilidade da composição estrutural destas permite a personalização do produto mediante a necessidade de uso. Contudo, os resultados evidenciaram que é preciso ter cautela ao modelar geometrias de peças contendo estruturas celulares irregulares, como as peças neste trabalho citadas. Apesar da estética interessante que estas possam dar ao produto, a escolha adequada da sua forma passa necessariamente por uma relação de compromisso com a resistência mecânica resultante da sua configuração estrutural.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das discussões e conclusões apresentadas com base na experiência e conhecimento adquirido ao longo do trabalho, são apresentadas sugestões para a continuação desta linha de pesquisa:

- Investigação de métodos alternativos de modelagem parametrizada, com possibilidade na construção das células de Voronoi de maneira tridimensional;
- Análise comparativa do resultado da aplicação das estruturas celulares em diferentes materiais e técnicas manufatura aditiva;
- Aplicação das estruturas celulares irregulares no projeto de produto para a manufatura aditiva com testes mecânicos sob a forma do produto;

## REFERÊNCIAS

3D Systems corp. Acesso em: 20 Maio 2015. <  
http://www.3dsystems.com/products>

AJATA, F. **Análise de equipamento protótipo de sinterização seletiva a laser para a fabricação de peças poliméricas com gradiente funcional de material.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

AJDARI, A. **Mechanical behavior of cellular structures: a finite element study.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. 2008.

AJDARI, A.; BABAEI, S.; VAZIRI, A. **Mechanical properties and energy absorption of heterogeneous and functionally graded cellular structures.** Procedia Engineering, v. 10, p. 219-223. 2011.

ALFORD, D.; SACKETT, P.; NEDLER, G. **Mass customization: An automotive perspective.** International Journal of Production Economics v. 65, p. 99-110. 2000.

ALLIEZ, P, et al. **Centroidal Voronoi diagrams for isotropic surface remeshing.** Graphical Models. v. 67-3, p. 204-231, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Determining the Charpy Impact. Resistance of Notched Specimens of Plastics.** ASTM D6110-10.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** ASTM D790-02.

ALVARADO, R. G.; MUÑOZ, J. J. **The control of shape: origins of parametric design in architecture,** in Xenakis, Gehry and Grimshaw. METU JFA. v. 29-1, p. 107-118. 2012.

Avira Stadium. BuroHappold Engineering. Acesso em: 21 Outubro 2014.

<<http://www.burohappold.com/projects/project/aviva-stadium-12/>>

BENI, L. H., et al. **Voronoi diagram: An adaptive spatial tessellation for processes simulation.** InTech. 304f. Rijeka: Shkelzen Cakaj. 2010.

BERNARD, A.; et al. **Computer-Aided Process Planning for automatic generation of 3D digitizing process for laser sensors.** Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin. 1999.

Bracket Airbus A320. EOS-Innovations Acesso em: 11 Junho 2014.  
<[www.eos.info/press/customer\\_case\\_studies/eads](http://www.eos.info/press/customer_case_studies/eads)>

BuroHappold Engineering. Acesso: 04 de Maio de 2015.  
<<http://www.burohappold.com/projects/project/aviva-stadium-12/>>

BUSWELL, R.; SOAR R.; GIBB, A.; THORPE, A. **Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction.** Automation in Construction. v. 16, p. 224-231. 2007.

CAMPOS, S.; et al. **Introduction of a design for rapid manufacturing (DFRM) perspective in engineering design education.** International conference on engineering and product design education. 2007.

CANEVAROLO, S., V, Jr. **Técnicas de Caracterização de Polímeros.** São Paulo. Artliber Editora. 2007.

CAULFIELD B., et al. **Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameter in the SLS process.** Journal of Materials Processing Technology. 2006.

CHEACH, C.M., et al. **Characteristics of Photopolimeric Material Used in Rapid Prototypes. Part I. Mechanical Properties in the Green State.** Journal of Materials Processing Technology. v. 67, p. 41-45. 1997.

\_\_\_\_\_, **Characteristics of Photopolymeric Material Used in Rapid Prototypes. Part II – Mechanical Properties at Post-Cure**

**State.** Journal of Materials Processing Technology. v. 67, p. 46-49. 1997.

CHUA, C.K.; LEONG, K.F.; LIM, C.S. **Rapid prototyping: Principles and Applications** World Scientific Publishing. Cingapura, 2004.

Cortex. Evill Design. Acesso em: 17 de Abril 2014. <<http://www.evilldesign.com/cortex>>

DESHPANDE, V.S.; FLECK, N.A.; ASHBY, M.F. **Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material.** *J. Mechanics and Physics of Solids.* v. 49-8, p.1747-1769. 2001.

DUARTE, J. **Inserção das novas tecnologias no curriculum de arquitetura, uma experiência.** *Revista Arquitetura e Vida.* v. 7, p. 106-110. Lisboa, 2007.

EDAG Genesis. Acesso em: 15 de Janeiro 2016. <<http://www.edag.com.br/br/edag-do-brasil/historias-edag/manufatura-aditiva.html>>

FERNANDES, G. A. **Resina fotopolimérica SOMOS 7110 para estereolitografia.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

FRIEDRICH, E., et al. **Emergent Form from Structural Optimisation of the Voronoi Polyhedra Structure.** Generative Art International Conference. Generative Art International Conference. Milão, 2007.

GAO, W. et al. **The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering.** *CAD Computer Aided Design.* v. 69, p. 65-89, 2015.

GIBSON, I.; et al. **Additive Manufacturing Technologies.** Berlin: Springer. 2010.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids: Structure and Properties.** Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

GUPTA, S.K.; et al., **Automated manufacturability analysis: a survey**. Research in Engineering Design. v. 9-3, p.168–190. 1997.

GÜRSEL, D. I. **Creative design exploration by parametric Generative systems in architecture**. METU JFA v.29 p.207-224. 2012

HAGUE, R.; CAMPBELL, I.; DICKENS, P. **Implications on design of rapid manufacturing**, Mechanical Engineering Science. v. 217-1, p.25-30. 2003.

HAGUE, R.; MANSOUR, S.; et al. **Design opportunities with rapid manufacturing**. Assembly Automation. v 23-4, p. 346-356. 2003.

HENSEL, M.; MENGES, A.; WEINSTOCK, M. **Emergent technologies and design: towards a biological paradigm for architecture**. Routledge, 2010.

HUDSON, R. **Strategies for parametric design in architecture. An application of practice led research**. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy University of Bath Department of Architecture and Civil Engineering, 2010.

HUDSON, R.; SHEPHERD, P.; AND HINES D. **Aviva Stadium:A case study in integrated parametric design**. International Journal of Architectural Computing. v. 09, p. 187-204. 2010.

JEN, Y-M., CHANG, L-Y. **Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters**. International Journal of Fatigue. v, 30, p. 1103-1114. 2008.

JESTER, P. E. **Shifting Gears: Exploring Parametric Design to Renovate an Urban Waterfront**. Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial 1. PhD Thesis, MIT, 2014.

KANG, S.L.; **Sintering: densification, grain growth & microstructure.** Elsevier Butterworth-Heinemann: Burlington, 2005.

KOLAVERIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing.** Oxford: Taylor & Francis. V. 314, 2005.

KULMAN, C. **Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, Brasil, 2006.

LAMPEL, J.; MINTZBERG, H. **Customising customisation,** Sloan Management Review. v. 38-1, p. 21-29. 1996.

LEITE, J. L. **Sinterização seletiva a laser de blendas de PA12/PEAD, PA6/PA12 e PMMA/PS com gradientes funcionais aplicáveis em componentes anti fricção.** Tese de doutorado. Curso de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2007.

LÉVY, B., e BONNEEL, N. **Variational anisotropic surface meshing with voronoi parallel linear enumeration.** Proceedings of the 21st International Meshing Roundtable. p. 349- 366. 2012.

LEVY, G.; et al. **Rapid tooling technologies enabling the integration of product design and production,** ISEM XIII, Bilbao, 2001.

LI, Z.; et al. **On crushing response of the three-dimensional closed-cell foam based on Voronoi model.** Mechanics of Materials. v. 68, p. 85-94. 2014.

LOZO, B., et al. **Three-Dimensional Ink Jet Prints-Impact of Infiltrants.** The Journal of Imaging Science and Technology. v.52, p.1-8. 2008.

LU, L., et al. **Build-to-last: Strength to weight 3d printed objects.** ACM Trans. Graph, 2014



LÜ, L.; FUH, J.; WONG Y.S. **Laser-induced materials and processes for rapid prototyping**, Massachusetts: Kluwer academic Publishers, 2001.

MATCHA, H.; et al. **Architectural Design with Parametric Modeling & Customized Mass Production: Explorations and Case Studies in Architectural Design and Production Methods**. The 11<sup>th</sup> International Conference of ISSEI. University of Hensinki, 2008

MEAGAN, R.; et al. **Effectiveness of virtual models in design for additive manufacturing: a laser sintering case study**. Rapid Prototyping Journal. v. 19, p. 11-19. 2013.

METEYERA, S., et al, **Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes**. 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering. v. 15, p. 19-25. 2014.

Mini Cooper. Acesso em: 14 Jan 2016. < <https://www.mini.co.uk>>

MIOC, D., et al. **Map updates in a dynamic Voronoi data structure**. InTech:Alberta. v. 6 p. 264-269. 2012

MOUSSAVI, F. **Parametric software is no substitute for parametric thinking**. The Architectural Review, 2011.

NARKIS, M., ROSENZWEIG, N. **Polymer powder technology**. John Wiley & Sons, Inglaterra, 1995.

OKABE, A.; et al. **Spatial Tessellations - Concepts and Applications of Voronoi Diagrams**. Wiley, vol. 2 p. 671, 2000.

OLIVEIRA, M. F., et al. **Construção de Scaffolds para engenharia tecidual utilizando prototipagem rápida**. v. 12. p. 373-382. 2007.

PAGGI, R. A. **Sinterização seletiva a laser de compósitos com gradiente funcional entre poliamida 12 e nanotubos de carbono aplicáveis no setor aeroespacial**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2008.

PANDA, B., N. **Design and Development of Cellular Structure for Additive Manufacturing**. A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirement for the Award of the Degree of Master of Technology (Research) in Industrial Design. National Institute of Technology, Rourkela-769008, India, 2015

PANOZZO, D., et al. **Frame fields: Anisotropic and nonorthogonal cross fields**. ACM Trans. Graph. 2014.

PELEGRINI, A. V. **O processo de modularização em embalagens orientado para a customização em massa: uma contribuição para a gestão do design**. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR, 2005.

PETROVIC, V.; et al. **Additive Manufacturing Solutions for Improved Medical Implants**. InTech. 200f. Rijeka: Shkelzen Cakaj. 2012.

PIETRONI, N., et al. **Voronoi Grid-Shell Structures**. ACM TO, arXiv: v.1, p. 08-91.2014.

PINE, B.J. **Mass Customisation: The New Frontier in Business Competition**. Harvard Business School Press. Boston, 1993.

ROSEN, D.W. **Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space**. The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, 2007.

RYDER, G.; et al. **Rapid Design and Manufacture Tools in Architecture**. Automation in construction. Amsterdam: Elsevier. v. 11-2, p.279-290. 2002

SCHOENBERG, F.P.; et al. **Inverting Dirichlet Tessellations**. Comput. J, v. 46, p. 76-83, 2003.

SILVA, M.J., e GIBSON, L.J. **The effect of non-periodic microstructure and defects on the compressive strength of two-**

**dimensional cellular solids.** INT. J. MECH. SCI. v. 30, p. 549-563. 1997.

STAVRIC, M.; MARINA, O. **Parametric Modeling for Advanced Architecture.** International Journal of Applied Mathematics and Informatics. vol. 5-1. 2011.

STEEN, W.; MAZUMDER, Jyotirmoy. **Laser material processing.** Londres: Springer-Verlang. 2010.

TERZIDIS, K. **Algorithmic form.** A. Menges and S. Ahlquist Computational Design Thinking. Wiley, 2011.

TOMIYAMA, T., et al. **Design methodologies: Industrial and educational applications.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 58, p. 543–565, 2009.

VOLPATO, N.; et al. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações.** São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

WOHLERS, T. **Wohlers report 2009.** Wohlers Associates. Colorado: Fort Collins. 2009.

WOLFF, J. **The Law of Bone Remodeling.** Berlim: Springer. 1986.

WORAKANCHANA, K., E MEGURO, K. **Voronoi applied element method for structural analysis: theory and application for linear and non-linear materials.** The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China. 2008.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Desenhos referentes aos ensaios de Impacto Charpy

Figura A.1 - Desenho do corpo de prova para ensaio de Impacto Charpy de acordo com a norma ASTM E23.

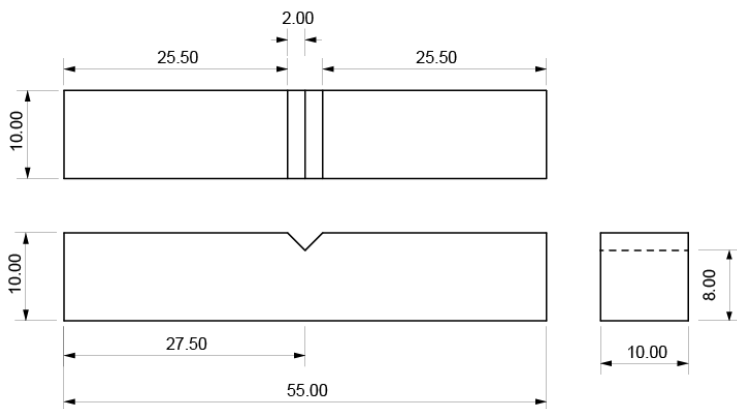


Figura A.2 - Configuração das células na vista superior do corpo de prova para ensaio de Impacto Charpy com 0,100 células por mm<sup>2</sup>.

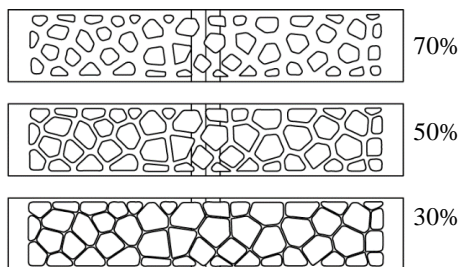


Figura A.3 - Configuração das células na vista superior do corpo de prova para ensaio de Impacto Charpy com 0,066 células por mm<sup>2</sup>

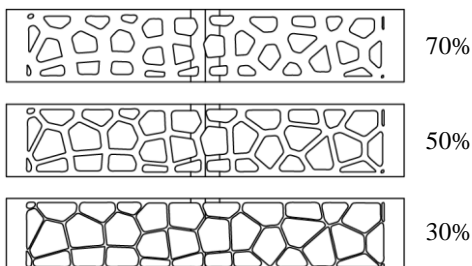
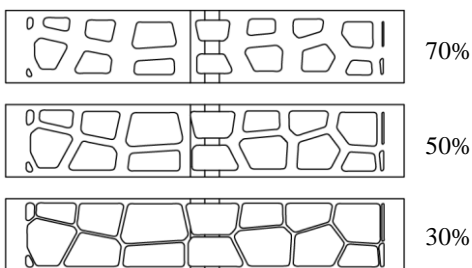


Figura A.4 - Configuração das células na vista superior do corpo de prova para ensaio de Impacto Charpy com 0,033 células por mm<sup>2</sup>



## APÊNDICE B - Desenhos referentes ao ensaio de flexão a três pontos

Figura B.1 - Desenho do corpo de prova para ensaio de flexão a três pontos de acordo com a norma ASTM D790-02

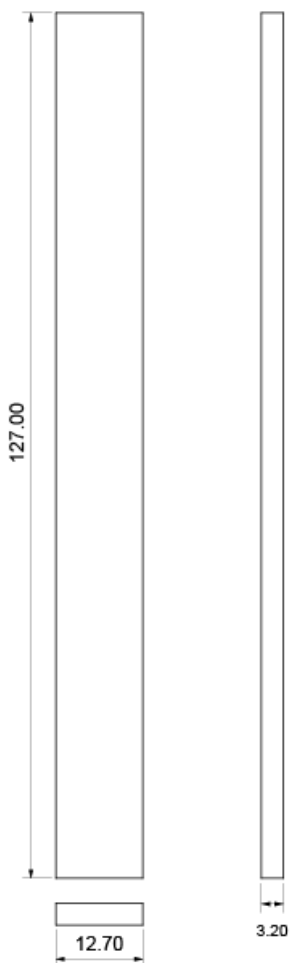


Figura B.2 - Configuração das células na vista superior do corpo de prova para ensaio de Flexão três pontos com 0,0200 células por mm<sup>2</sup> (esquerda), 0,0132 células por mm<sup>2</sup> (centro) e com 0,0066 células por mm<sup>2</sup> (direita)

